ELEKTRIE 3|88

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN Postverlagsort für DDR Leipzig EVP 2,50 Mark ISSN 0013—5399

Zur 5. Fachtagung Leistungselektronik

Tafel 1. Hauptanwendungsgebiet: Gs-Antriebstechnik

Lfd. Nr.	Erzeugnis-Benennung		Anschlußspannung V	Ausgangsstrom A	Herstellerbetrieb	Sonstiges
1.1.	Thyristor-Stromrichter für Gs-Antriebe und andere spez. Anwendungsgebiete	ET1	380	20; 30	VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin	vorwiegend Stromrichtersatz
		DTO (uni)	380	25 bis 250		
		DTO (WMW)	380	25 bis 250		
		DT1	380 500	25 bis 250		
		DT2	380 500	400 bis 1000		vorwiegend Schrankausführung
		DT3/4	≦ 925	> 1000		(vom VEB EAW mit Leistungsteil)
Alle Stromrichter sind in Varianten für Einrichtungs- und Umkehrantriebe und zahlreiche Anwendungsfälle lieferbar.						
1.2.	Thyristor-Stromrichter für Gs-Antriebe und weitere Stromversorgungsaufgaben		220 380 500	6 10 16	VEB EAW-Elektronik Dresden	Stromrichter-Sätze für Einrichtungsbetrieb
1.3.	desgl.		220 380	6 10 16	desgl.	2 Stromrichtersätze ermöglichen kreisstrombehafteten Umkehrbetrieb
1.4.	Thyristor-Stromrichter für Gs-Antriebe kleiner Leistung		220	2,5	desgl.	Stromrichter-Satz oder -Gerät im Gehäuse für Einrichtungsbetrieb
1.5.	Thyristor-Stromrichter für Gs-Antriebe TDR 700		260 380	50	VEB Numerik „Karl-Marx"	Stromrichter-Satz für hochdynamischen kreisstromfreien Umkehrbetrieb
1.6.	desgl. TDR 20		220 380	25	desgl.	Stromrichter-Satz für einfache Einrichtungsantriebe
1.7.	desgl. TDR 100		220 380	12	desgl.	Stromrichter-Satz für hochdynamischen kreisstromfreien Umkehrbetrieb

Tafel 2. Hauptanwendungsgebiet: Ds-/Ws-Antriebstechnik

Lfd. Nr.	Erzeugnis-Benennung	Anschlußspannung V	Ausgangsstrom A	Herstellerbetrieb	Sonstiges
2.1.	Wechselstromsteller	380 500	10 bis 152 kVA	VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin	Stromrichter-Schrank, Spannungssteuerung für Elektrofilteranlagen des VEB TUR Dresden und für spezielle andere Aufgaben
2.2.	Wechselstromsteller	220	2,5/6,3/10,0	VEB Elektromotorenwerk Eggesin	Stromrichter-Satz für Spannungssteuerung von Einphasen-Asynchron-Motoren für Lüfter und Kreiselpumpen
2.3.	Wechselstromsteller mit Regeleinrichtung	220 380	35 50	VEB EAW-Elektronik Dresden	Stromrichter-Satz für Stellung der Drehzahl von Ds-Motoren und anderer technologischer Größen
2.4.	Drehstromsteller DTO/DT 1-C	380	bis 200	VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin,	Stromrichter-Satz
2.5.	Drehstromsteller	380	6/7,5	VEB Elektromotorenwerk Barleben	Stromrichter-Satz Spannungssteuerung von Ds-Kurzschlußläufermotoren für Pumpen und Lüfter
2.6.	Thyristorsteller für Krane DTO	380, 500	bis 200	VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin	Stromrichter-Satz
2.7.	Transistor-Frequenz-Umrichter EDU 210/8	220	8	VEB Elektromotorenwerk Thurm	Stromrichter-Satz für Antriebe mit Ds-Standard-Asynchronmaschinen, Ausgangsfrequenz 5 bis 100 Hz
2.8.	desgl. DDU 370/16,5-G	380	16,5	VEB Elektromotorenwerk Wernigerode	desgl. Ausgangsfrequenz 1 bis 100 Hz
2.9.	Thyristor-Frequenz-Umrichter DU 1 bis 3	380 500	38, 45, 95, 150, 72, 115	VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin	desgl. Schrankausführung (Pulswechselrichter) Ausgangsfrequenz 1 bis 100 Hz
2.10.	desgl. DU 6	380	30, 50, 205	desgl.	desgl. Schrankausführung Ausgangsfrequenz 5 bis 50 Hz oder 5 bis 87 Hz (Stromzwischenkreis-Umrichter)
2.11.	Transistor-Frequenz Umrichter P 6110	380	4 kVA	VEB Robotron-Rationalisierung Weimar	Stromrichter-Satz für Antriebe mit Ds-Standard-Asynchronmaschinen Ausgangsfrequenz 5 bis 100 Hz (1000 Hz)
2.12.	Transistor-Pulssteller TPS 701	190 über Vorschalttrafo	12	VEB Numerik „Karl-Marx" Karl-Marx-Stadt	Stromrichter-Satz für Stellmotorenantriebe
2.13.	Untersynchrone Stromrichter-Kaskade			VEB Elektroprojekt und	Antriebe mit Ds-Schleifringläufermotor ab 200 kW bei Drehzahlstellbereich $0{,}5\ n_s \leqq n \leqq 0{,}9\ n_s$ Schrankausführung
	DT 2 — USK	380 500	410 bis 820	Anlagenbau Berlin	
	DT 4 — USK	380 bis 1000	> 1000		

Stromrichterprogramme der DDR-Herstellerbetriebe — ein Überblick s. Seite 84

3|88 ELEKTRIE

42. Jahrgang

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift der Elektrotechnik

ISSN 0013-5399

Organ des Fachverbands Elektrotechnik der Kammer der Technik

Die Zeitschrift erhielt die Goldene Ehrenplakette der KDT

Redaktionsbeirat

Vorsitzender:

Prof. Dr. sc. techn. J. Vogel

Mitglieder:

Prof. Dr. sc. techn. S. Altmann · Prof. Dr. sc. techn. H. Böhme · Prof. Dr. sc. techn. P.-K. Budig · Dr. sc. techn. G. Burkhard · Dr.-Ing. D. Flügge · Ober-ing. K. Friedel · Prof. Dr. sc. techn. J. Hoffmann · Dipl.-Ing. H. Kabisch · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Lappe · Dr. rer. nat. K. Möbius · Prof. Dr. sc. techn. E. Muschick · Prof. Dr. sc. techn. V. Pfeiler · Prof. Dr.-Ing. e. h. K. Pommer · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Schönfeld · Obering. Dipl.-Ing. N. Wass · Prof. Dr.-Ing. habil. G. Wunsch

Korrespondenten:

Dr.-Ing. Hannella, Ilmenau · Dr.-Ing. W. Jordan, Dresden

Titelbild

Stromrichter werden im Bereich von 40 bis 250 A mit spezieller Informationselektronik vor allem für Drehmaschinen und ähnliche Anwendungsfälle geliefert. Die Regelungs- und Steuerungseinrichtungen sind für die Anpassung an Automatisierungslösungen des Werkzeugmaschinenbaus, z. B. CNC-Steuerungen, geeignet. Unser Foto zeigt im Mittelpunkt des Bildes einen Stromrichter des Typs DT 0/WMW des VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin für Werkzeugmaschinen-Hauptantriebe, im Hintergrund umgeben von weiteren derartigen Erzeugnissen, um den Serienscharakter zu demonstrieren. Fragen der Stromrichter/Leistungselektronik stehen im Mittelpunkt dieses Heftes.

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Träger des Ordens Banner der Arbeit

Inhalt

Seite

Aktuelle Informationen 82

Budig, P.-K.

Leistungselektronik im technologischen Prozeß 83

Stromrichterprogramme der DDR-Herstellerbetriebe — ein Überblick 84

Fachaufsätze

Kabisch, H.

Stromrichter und drehzahlverstellbare Antriebe in der Prozeßautomatisierung 85

Krause, J.

Mikroelektronik in der Antriebstechnik — Stand und Tendenzen 91

Geitner, G.-H.; Dittrich, A.; Eckstein, A.; Pfeiffer, M.; Eckardt, S.

Technologische Kopplung von DDC-Gleichstromantrieben 95

Budig, P.-K.

Drehzahlvariable Drehstromantriebe 100

Fischer, W.; Mecke, H.

Thyristorschweißumrichter 109

Schönfeld, R.; Eulitz, T.

Simulation von Stromrichter-Maschinen-Systemen 112

Umschau

Fachtagungen 116

Bücher 117

AKTUELLE INFORMATION

Pulscodemodulationstechnik

KDT-Lehrgang an der Ingenieurhochschule Wismar

Zeit: 30. Mai bis 3. Juni 1988
Ort: IH Wismar
Veranstalter: Lehrstuhl Nachrichtentechnik an der Sektion Elektrotechnik/Elektronik der IH Wismar; BV der KDT Schwerin; WS Nachrichtentechnik

Im Lehrgang werden Grundlagen der Pulscodemodulation vermittelt und deren praktische Anwendung in der Nachrichten-Übertragungstechnik, der Automatisierungstechnik und auf weiteren Gebieten behandelt. Praktische Übungen vertiefen die theoretischen Kenntnisse.

Anfragen

Kammer der Technik
BV Schwerin, Abt. Weiterbildung
Schusterstr. 2, Schwerin, 2751
H. Pohlers, Wismar EA 2758

Neue NS-Schalt- und Verteilungsanlagen — Stand, Entwicklung

Informationstagung

Zeit: 1. Juni 1988
Ort: Hohenstein-Ernstthal, Kreiskulturhaus

Veranstalter: Bezirksfachausschuß „Elektrotechnische Anlagen" beim BV Karl-Marx-Stadt der KDT gemeinsam mit den Betriebssektionen im VEB Starkstrom-Anlagenbau und in der TU Dresden

Inhaltliche Schwerpunkte

— Die neue NS-Schaltgerätekombination VESA stat. (Aufbau und Funktion; Besonderheiten der Lichtbogensicherheit und Schutzgüte)
— Netzrückwirkungen und Energiequalität
— Einsatz von Saugkreisanlagen in NS-Netzen

Anfragen

Kammer der Technik
BV Karl-Marx-Stadt,, Tel. 62141
Annaberger Str. 24, Karl-Marx-Stadt, 9001
G. Heliosch, Karl-Marx-Stadt EA 2786

Anwendung mathematischer Methoden bei der Lösung von Problemen in Technik und Technologie

6. Wissenschaftliche Tagung im Rahmen der Tage der Wissenschaft und Technik

Zeit: 6. September 1988
Ort: IH Wismar
Veranstalter: IH Wismar, Abteilung Mathematik/Naturwissenschaften; Mathematische Gesellschaft der DDR

Inhaltliche Schwerpunkte

— Mathematische Theorie der Diskretisierungsmethoden
— Algorithmen und numerische Realisierung von Diskretisierungsmethoden
— Anwendung von Diskretisierungsmethoden in der Mechanik
— Theorie und Anwendung der verallgemeinerten Funktionen in der Mathematischen Physik
— Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Instandhaltung von technischen Systemen
— Effektive Algorithmen bei Zuverlässigkeitsanalysen
— Mathematische Modellierung von Produktionsprozessen

Anfragen

Ingenieurhochschule Wismar, Tagungsbüro Philipp-Müller-Straße, Wismar, 2400
W. Preuß, Wismar EA 2755

Kleinantriebe für die Automatisierungs- und Heimtechnik

8. Symposium Elektromaschinenbau

Zeit: 13. und 14. September 1988
Ort: Leipzig, Leipzig-Information, Sachsenplatz
Veranstalter: FUA „Kleinmaschinen" im KDT-Aktiv des VEB Kombinat Elektromaschinenbau

Aus Anlaß seines 20jährigen Bestehens führt der KDT-Fachunterausschuß „Kleinmaschinen" das 8. Symposium als Fachtagung durch, die den Kleinantrieben für den Einsatz in der Automatisierungs- und Heimtechnik gewidmet ist.

Inhaltliche Schwerpunkte

— Komponenten für Kleinantriebe
— Qualität und Technologie bei Kleinmaschinen
— Kleinantriebe
— das Erzeugnissortiment der DDR bei Kleinmaschinen und vorliegende Einsatzerfahrungen
— Maßnahmen der Hersteller zur Sicherung einer gleichbleibend hohen Erzeugnisqualität
— realisierte Antriebslösungen und daraus resultierende Erkenntnisse für weitere Einsatzfälle

Anfragen

VEB Kombinat Elektromaschinenbau, KDT-Aktiv
Hennigsdorfer Straße 25, Dresden, 8017
Die Teilnahme ist nur bei Bestätigung der Teilnahmeanmeldung möglich.
H. Halle, Dresden EA 2774

Elektrotechnologie

6. Fachtagung im Rahmen der Wissenschaftlichen Tage 1988 der TU „Otto von Guericke" Magdeburg

Zeit: 13. und 14. September 1988
Ort: TU „Otto von Guericke" Magdeburg
Veranstalter: Sektion Automatisierungs- und Elektrotechnik; Wissenschaftliche Sektion Elektrotechnologie der KDT

Inhaltliche Schwerpunkte

Im Zusammenwirken mit Wissenschaftlern und Praktikern des In- und Auslandes wird die Nutzung von Wirkprinzipien der Elektroenergie für die Erneuerung technologischer Prozesse und Erzeugnisse beraten:

— Elektrowärmetechnologien
Stoff- und Teilbehandlung, rationeller Energieeinsatz, Anlagentechnik, CAM-Elektronik
— Lichtbogentechnologien
Lichtbogenphysik, Prozeßanalyse, elektronische Stromquellen, Steuerungen
— Elektrobearbeitungstechnologien
Verfahren, Verfahrenselektronik, Anlagen, Fertigungsplanung/-programmierung
— Strahltechnologien
Laser, Elektronen- und Plasmatechnik, Produktionsverfahren
— Metallurgische Beschichtungstechnologien
Galvano-, Bedampfungs-, Sputter- und Plasmaspritztechnik — alternative Wertung

Nach dem traditionsgemäßen Anliegen der Fachtagungsreihe Elektrotechnologie informiert die Fachtagung über den Entwicklungsstand und die Bedingungen der technologischen Verfügbarkeit interdisziplinärer Leistungen der Naturwissenschaften, der Elektrotechnik und des Maschinenbaus für neue technologische Lösungen und Erzeugnisse. Dabei werden Einsatzerfahrungen im Umgang mit neuen Bearbeitungsverfahren vermittelt.

Anfragen

Technische Universität
„Otto von Guericke" Magedeburg
Tagungsbüro. Tel.: 592209
Postschließfach 124, Magdeburg, 3010
A. Neubauer, Magdeburg EA 2760

Neue Telefon-Nummern des Präsidiums der Kammer der Technik

Ab sofort haben die Auskunft, die Abteilung Öffentlichkeitsarbeit, die Fachverbände (FV) und die Wissenschaftlich-Technischen Gesellschaften (WTG) neue Ruf-Nummern:

2265 0 Auskunft
2265242 Abt. Öffentlichkeitsarbeit
2265295 FV Bauwesen
2265224 FV Chemische Technik
2265231 FV Elektrotechnik
2265237 FV Fahrzeugbau und Verkehr
2265228 FV Holz-Papier-Polygraphie
2265229 FV Land-Forst- und Nahrungsgütertechnik
2265257 FV Lebensmittelindustrie
2265300 FV Maschinenbau
2265233 FV Silikattechnik
2265223 FV Textil-Bekleidung-Leder
2265298 FV Wasser
2265222 WTG für Energiewirtschaft in der KDT
2265304 WTG für Meß- und Automatisierungstechnik in der KDT

Das Präsidium hat die Anschrift

Kammer der Technik
Präsidium
PSF 1315
Berlin
1086

Die Redaktion EA 2790

Leistungselektronik im technologischen Prozeß

Von

Prof. Dr. sc. techn.
Peter-Klaus Budig

Vizepräsident der
Kammer der Technik
Wissenschaftsbereichsleiter
an der Sektion Automatisierungstechnik
der Technischen Universität
Karl-Marx-Stadt

Die Erzielung material- und energieökonomischer Effekte ist im allgemeinen nur dann erreichbar, wenn in hoher Präzision die erforderliche Energie dem Produktionsprozeß in dem Umfang und der Form zur Verfügung gestellt wird, die der technologische Prozeß erfordert. Zur Erzielung hoher Leistungen für Spitzentechnologien ist daher die Bereitstellung der Elektroenergie von besonderer Bedeutung. Sie dem technologischen Prozeß genau anzupassen, ist eine der wesentlichen Aufgaben des Arbeitsgebietes, das mit dem Wort Leistungselektronik bezeichnet wird. Hierunter werden Stromrichteranlagen verstanden, die es ermöglichen, die vom Netz zur Verfügung gestellte elektrische Energie dem technologischen Prozeß anzupassen. Solche Prozesse sind elektrische Antriebe, elektrochemische Prozesse, elektrophysikalische Prozesse. Das reicht, konkret betrachtet, vom Vorschubantrieb für Werkzeugmaschinen oder dem Hauptantrieb der Werkzeugmaschinen über die Antriebe von Textilmaschinen, von Walzenstraßen oder Fördermaschinen und Schiffen bis zu Nah- und Fernverkehrsmitteln. Bei den technologischen Prozessen auf chemischer Basis seien galvanische Prozesse und bei elektrophysikalischen Vorgängen Schweißen, Schmelzen nach dem Induktionsverfahren, Erzeugung von Wärme zur Oberflächenbehandlung oder Schmelz- und Beschichtungsprozesse mit Plasma-, Ionen- oder Elektronenstrahlen genannt. Allen diesen technologischen Prozessen ist das Erfordernis gemeinsam, dem technologischen Prozeß angepaßt, Spannungen im Fall der Verwendung von Gleichstrom oder Spannungen und Frequenzen im Fall der Anwendung von Drehstrom zur Verfügung zu stellen.

Die Technik, mit Gleichstrom zu arbeiten, hat sich auf dem Gebiet der elektrischen Antriebe stürmisch entwickelt und einen hohen Reifegrad erreicht. In den letzten Jahren sind in zunehmendem Maße Drehstromantriebe deshalb interessant geworden, weil der Zwang zur Einsparung von Energie bei zahlreichen Antriebsproblemen den wenig umweltfreundlichen Gleichstrommotor nicht oder nur mit hohen ökonomischen Aufwendungen einzusetzen, während der kontaktlose Drehstrommotor einfach im Aufbau, robust und der Umwelt leicht anpaßbar ist. Die Drehstromantriebstechnik greift dabei auf die Technik der Direktumrichter und der Zwischenkreisumrichter zurück. Man kann einschätzen, daß heute ausgereifte Stromrichterkonzepte auf der Basis der bekannten Bauelemente Transistoren, GTO und Thyristoren vorliegen. Dennoch gibt es außerordentlich große Bemühungen, bei den Schaltungslösungen mit diesen Bauelementen den Schaltungsaufwand zu minimieren, die Verluste im Stromrichter zu minimieren und auch die Techniken der Steuerung weiter auszureifen. Neue leistungselektronische Bauelemente beleben dieses Geschehen immer wieder und orientieren auf weitere Minimierung der Bauvolumen der Stromrichter und auf die Senkung ihrer Verluste. Die Ansteuertechnik ebenso wie die vorgelagerte Regelungstechnik, ursprünglich in analogen Schaltungen aufgebaut, hat sich immer mehr der Digitaltechnik auf der Basis von 8- oder 16-bit-Verarbeitungsbreite zugewandt. Es ist zu erkennen, daß zur Abarbeitung von Reglerfunktionen, zur Koordinierung von Frequenzen und Spannungen und zur Bildung der Ansteuerpulsmuster die 16-bit-Rechentechnik heute Lösungen ermöglicht, die sehr flexibel dem jeweiligen Anwendungszweck anpaßbar sind und die als unifizierte Lösungen verwendet werden können. Die Entwicklungsrichtungen sind hier insbesondere durch neuartige Reglerstrukturen unter Einbeziehung der adaptiven Regelung und der Zustandsregelung mit Beobachter zu sehen.

Die unmittelbare Nähe von Mikro- und Leistungselektronik bringt hohe Forderungen an die Beherrschung des störungsfreien Betriebes. Es ist gelungen, heute im gleichen Gefäß eine Technik unterzubringen, die auf der einen Seite im kA-Bereich und auf der anderen Seite im µA-Bereich arbeitet. Die Fragen der Zuverlässigkeit spielen eine zunehmende Rolle, da hohe Verfügbarkeit der Antriebe insbesondere in automatisierten Abläufen unabdingbare Voraussetzung ist, einen ökonomisch erfolgreichen Betrieb fahren zu können. Jeder Ausfall bringt ökonomische Verluste. Daher erhalten in zunehmendem Maße Diagnoseverfahren Bedeutung. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, den inneren Zustand der Stromrichtertechnik zu beobachten und zu beurteilen und sich anbahnende Fehlerursachen so rechtzeitig zu erkennen, daß sie außerhalb der produktiven Zeiten beseitigt werden können.

Der Einsatz der Stromrichtertechnik auf dem Gebiet der Antriebstechnik bringt zwangsläufig auch neuartige Forderungen an die Dimensionierung der elektrischen Maschinen und der Antriebssysteme selbst. Im ersten Fall entstehen zusätzliche thermische Beanspruchungen in den Motoren, es werden Pendelmomente entwickelt, und schließlich beeinflussen die Pendelmomente Stabilität und Betriebszuverlässigkeit anzutreibender Aggregate. Es gibt heute ausreichende Programme zur Simulation stationärer und dynamischer Betriebsverhältnisse, zur Untersuchung spezieller Betriebssituationen und zu ihrer Berücksichtigung im Rahmen der Projektierung der Antriebsanlagen. Die Frage nach der schnellen Reaktion auf die Marktsituation erfordert, mit den Methoden des rechnergestützten Entwurfs zu arbeiten. Umfangreiche Anstrengungen gibt es, rechnergestützte Projektierung von Reglern, Ansteuereinrichtungen und Stromrichtern bis zu kompletten Antriebssystemen zu realisieren, die es ermöglichen, stationäre und dynamische Betriebsvorgänge zu untersuchen. Das ist nur auf der Basis hochwertiger Rechentechnik möglich. Ziel dabei ist es, nicht die Aufgabe schlechthin zu lösen, sondern möglichst auch mit den zur Verfügung stehenden PC-Rechnern arbeiten zu können und ausreichende Aussagen zu erhalten.

In ähnlicher Form ist auch die Aufgabe

Stromrichterprogramme der DDR-Herstellerbetriebe – ein Überblick

Zur 5. Fachtagung Leistungselektronik

In der DDR werden jährlich einige Tausend Stromrichter (Erzeugnisse der Leistungselektronik) verschiedener Leistungsbereiche (von wenigen kW bis zu einigen MW) und zahlreicher Anwendungsgebiete produziert und zusätzlich noch eine größere Anzahl dieser Erzeugnisse importiert. Das zeigt die Bedeutung der Leistungselektronik im Prozeß der stark zunehmenden Elektronisierung und Automatisierung der Industrie bei umfassender Verflechtung technologischer Teilprozesse, der höheren Forderungen an Genauigkeit und Dynamik der technologischen Abläufe. Im Verkehrswesen ist ebenfalls ein starker Zuwachs bei der Verwendung leistungselektronischer Erzeugnisse zu verzeichnen.

Die Stromrichter ermöglichen als statische Stellglieder für die Energieumformung vor allem bei hohem Wirkungsgrad auch energieökonomisch günstige Anlagenlösungen. Hierbei spielt der Aufschwung der Mikroelektronik eine große Rolle, weil er effektive Lösungen von Steuerungs- und Regelungsaufgaben ermöglicht.

Das alles gilt nicht nur für den Neubau von Anlagen, sondern in steigendem Umfang auch für die Rekonstruktion vorhandener Ausrüstungen.

Der Bedarf an diesen Erzeugnissen hat sich nicht erst jetzt entwickelt, sondern er ist seit etwa 35 Jahren zunächst stetig, in den letzten Jahren aber progressiv angewachsen. Das gilt auch für die inhaltliche technische Entwicklung der Erzeugnisse.

Der Einsatz der Rechentechnik und neue noch leistungsfähigere mikro- und leistungselektronische Bauelemente und Schaltungsstrukturen werden weitere Anwendungsgebiete erschließen. Die Leistungsfähigkeit der stromrichterproduzierenden Industrie wird sich entsprechend diesen Bedingungen steigern.

Der FUA 1.10 (Stromrichteranlagen) im Fachverband Elektrotechnik der KDT hat sich im Rahmen der technischen Gemeinschaftsarbeit die Aufgabe gestellt, entsprechend seinen Möglichkeiten zwischen den verschiedenen Herstellerbetrieben und Anwendern zu einer gewissen Koordinierung beizutragen, er nimmt aber auch Einfluß auf die Einheitlichkeit sowie die Bau-, Prüf- und Einsatzbedingungen der Stromrichter. Hierzu wird laufend das Vorschriftenwerk der DDR, insbesondere der Standard TGL 200-0608 (Stromrichteranlagen, -geräte und Stromrichter) komplettiert. Diese Tätigkeit trägt auch zur Verbesserung der Qualität und zur Übereinstimmung mit internationalen Standardforderungen bei.

Die Stromrichtererzeugnisse werden gegenwärtig vor allem für folgende Hauptanwendungsgebiete eingesetzt:

1. Gs-Antriebs-Technik
2. Ds/Ws-Antriebs-Technik (Steller und Umrichter)

} mit sehr breitem Anwendungsbereich u. a. in der metallurgischen sowie metallverarbeitenden, Textil-, Papier-, Lebensmittel- und sonstigen Maschinenbauindustrie

3. Elektrotechnologische Prozesse, z. B.
   - — Schweißen
   - — Schmelzen (Induktions-, Plasma- usw.)
   - — Härten
   - — Glühen/Erwärmen
   - — Sintern
   - — Schmieden
   - — Bedampfen
4. Gleichspannungsversorgung, z. B.
   - — Industrienetze
   - — Fernmeldenetze
   - — Lichtstellung für Bühne, Fernsehen und Landwirtschaft
   - — statische Erregung von Synchronmaschinen
   - — Batterieladung
5. Wechselspannungsversorgung, z. B.
   - — Netzersatzanlagen/USV
   - — Signalanlagen für Bahnen
6. Stromversorgung von Gs-Bahnen
7. Stromversorgung von Hochstromanlagen für Elektrolysen und Galvanik
8. Elektrotriebfahrzeuge — Fahrantriebe — Bordnetzversorgung.

Es gibt natürlich heute und vor allem in der Zukunft noch weitere Anwendungsgebiete für die Stromrichtertechnik nicht nur zu Lande, sondern zunehmend auch auf Schiffen aller Art. Manche Anwendungsbereiche, z. B. der Ds-Antriebs-Technik, können noch erweitert werden, was auch vorgesehen ist. Hierdurch ist zunächst keine Bedarfsverringerung bei der Gs-Antriebs-Technik eingetreten, aber zukünftig wohl zu erwarten.

Besonders hervorzuheben ist in letzter Zeit der Zuwachs an Anwendungsbreite bei den elektrotechnologischen Prozessen. Auf den steigenden Umfang des Stromrichterbedarfs werden sich sowohl die produzierende Industrie als auch die Anwender einstellen müssen, wobei letztere eine rechtzeitige Qualifizierung zur effektiven Nutzung dieser Ausrüstungen zu beachten haben.

Bei der Betrachtung leistungselektronischer Erzeugnisse darf die umfangreiche Konsumgüter-Elektronik nicht vergessen werden, die in großem Umfang Stromrichter sehr kleiner Leistungsbereiche enthält, hier aber nicht betrachtet werden soll.

Die Tafeln 1 bis 7 (2. und 3. Umschlagseite) geben einen Überblick über die wesentlichen derzeitig serienmäßig in der DDR produzierten Stromrichterprogramme zu den genannten 8 Hauptanwendungsgebieten. Darüber hinaus gibt es natürlich noch zahlreiche Spezialausführungen.

Hierzu noch folgende Bemerkungen:

- — Es sind hier nur einige wichtige technische Daten genannt, um einen Überblick zu ermöglichen. Diese Angaben sind für die Einsatzvorbereitung nicht ausreichend!
- — Technische Einzelheiten, Einsatzbedingungen, Preise und Liefermöglichkeiten sind bei den jeweiligen Herstellerbetrieben zu erfragen.
- — Diesen Tafeln liegt umfangreiches Katalog- und Informationsmaterial der Herstellerbetriebe zugrunde.

Obering. H. Tischer
Vorsitzender des FUA 1.10
(Stromrichteranlagen)
im Fachverband
Elektrotechnik der KDT

EA 2710

---

der gestellten oder geregelten Zuführung von Elektroenergie zu technologischen Prozessen zu lösen. Dabei ist es unerheblich, ob Gleich- oder Wechselspannung zur Verfügung zu stellen ist. Wesentlich ist, daß auch in diesen Fällen die Regelung und Steuerung der Stromrichter mit mikroelektronischen Mitteln erfolgt.

Damit wird deutlich, daß in breitem Maße in der Volkswirtschaft in Zukunft Mikroelektronik und Leistungselektronik auf engstem Raum zusammengedrängt zum Einsatz kommt. Das erfordert hohe Qualifikation bei den Betreibern, um diese Technik betreiben und auch warten zu können. Die Aufgaben der Weiterbildung sind daher nicht zu unterschätzen und vornehmste Arbeitsaufgabe auch der Gremien der Kammer der Technik. Das gilt in ähnlicher Form auch für die Qualifizierung der Konstrukteure und Projektanten von Maschinen, Anlagen und Verfahren, denn nur dann, wenn auch sie über die Möglichkeiten und Grenzen der modernen Mikro- und Leistungselektronik ausreichend informiert sind, können sie diese Techniken in ihre Lösungen einbeziehen. Es gibt heute zahlreiche Anwendungsbeispiele für die Drehstromantriebstechnik auf dem Gebiet der Pumpen, Verdichter und Kompressoren und von Antrieben in der Leichtindustrie, die zeigen, daß diese moderne Technik mit großem Erfolg eingesetzt werden kann.

Die 5. Fachtagung Leistungselektronik, die wiederum in dankenswerter Weise der Fachunterausschuß 1.10 „Stromrichteranlagen" im Fachverband Elektrotechnik der Kammer der Technik ausgerichtet hat, hat die Aufgabe, das Wissen um den erreichten Stand und die Tendenzen der weiteren Entwicklung der Stromrichtertechnik breiten Kreisen der Hersteller und Anwender dieser Technik bekannt zu machen.

Ich wünsche der 5. Fachtagung Leistungselektronik einen erfolgreichen Verlauf!

EA 2709

Stromrichter und drehzahlverstellbare Antriebe in der Prozeßautomatisierung

H. Kabisch, KDT, Berlin

Unter dem Gesichtspunkt wirtschaftlichen Energieeinsatzes in Elektroenergieanlagen und zur Prozeßautomatisierung bestimmen Quantität und Qualität leistungselektronischer Bauelemente das wissenschaftlich-technische Niveau autonomer Energieumwandlungseinheiten wie auch komplexer Automatisierungslösungen. Im Mittel- und Hochspannungsbereich werden Stellglieder und Schalter u. a. in Verbindung mit Grenzleistungsantrieben zur dynamischen Blindstromkompensation, zur Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ), für Netzentkopplung und zur 50/16 2/3 Hz-Umformung eingesetzt.
Die DDR und der auf diesem Gebiet führende Betrieb VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin (EAB) konzentriert sich vor allem auf Stromrichter, die als „intelligentes Stellglied" im Bereich der prozeßnahen Ebene zur Stellung/Wandlung elektrischer Energie neben anderen Stellgliedern wie Schalter, Regelventile benötigt werden. Sie haben nach manuellen Eingaben, im Bereich der Prozeßautomatisierung nach Vorgabe übergeordneter Automatisierungseinrichtungen, Spannung, Strom, Winkel/Lage, mechanisches Moment, Drehzahl usw. mit der vom technologischen Prozeß geforderten Dynamik und Genauigkeit bereitzustellen.

1. Anwendung der Stromrichtertechnik

Die Fähigkeit, auf unterschiedliche Stromrichter-Wirkprinzipien zugeschnittene Dioden-, Thyristor- und Transistortypenreihen Gerätereihen mit zunehmend „maßgeschneiderten" Dioden, Thyristoren und/oder Transistoren zu realisieren und insbesondere die dynamischen Leistungsparameter ständig zu verbessern, ist bestimmend für Ökonomie und damit Anwendungsbreite, wie zum Beispiel das starke Wachstum der Drehstromantriebstechnik zeigt. Daneben spielt die Beherrschung der unterschiedlichen Schaltungsprinzipien in immer engerer Wechselwirkung zwischen Netz — Stromrichter — Verbraucher — Prozeß eine entscheidende Rolle. Das wissenschaftlich-technische Niveau wird aber nicht zuletzt auch durch die Anwendung neuer Bauelemente und Materialien bestimmt und davon, wie die Anwendung der Mikrorechentechnik nicht nur zum Ersatz analoger Signalverarbeitungseinrichtungen, sondern zur Realisierung neuer Möglichkeiten bis zur Umgestaltung des zu automatisierenden Prozesses genutzt wird. Die Qualität der Stromrichtertechnik gegenwärtig und in der Zukunft wird also nicht zuletzt dadurch bestimmt, daß durch die Hersteller eine kontinuierliche interdisziplinäre Zusammenarbeit mit Zuliefer- und Anwenderindustrie organisiert wird. Das Kombinat Automatisierungs- und Anlagenbau (KAAB) verfolgt deshalb auch weiterhin eine solche Grundlinie, wobei das Kernstück auf dem Gebiet der Forschung die langjährige Zusammenarbeit mit den Universitäten in Dresden, Karl-Marx-Stadt, Magdeburg und auf ausgewählten Gebieten auch mit der Universität in Rostock bzw. der TH Ilmenau ist. Vor allem mit dem Eindringen der Mikrorechentechnik in den antriebs- und stromrichternahen Bereich wird deutlich, daß optimale Lösungen nur bei ausreichender Berücksichtigung des Stromrichters in seiner Umwelt (siehe oben genannte Wirkungskette, EMC-Störungen, mechanische und klimatische Beanspruchungen im prozeßnahen Bereich) möglich sind, daß eine stärker auf Anwendertechnologie orientierte Betrachtungsweise als für übergeordnete Automatisierungssysteme notwendig ist.

2. Anwendung und Entwicklungsrichtung

Die wesentlichsten Anwendungsgebiete der auf Prozeßautomatisierung orientierten Stromrichtertechnik zeigt Bild 1. HGÜ und die obere Leistungsgrenze der Blindstromkompensation in Hochspannungsnetzen zeigen Leistungsbereiche der Energietechnik an. Aber auch im auf den Produktionsprozeß orientierten Anwendungsbereich gibt es zahlreiche Unterschiede vor allem hinsichtlich Arbeitsfrequenz, Spannungs-, Leistungs- und Strombereich in der konstruktiven Gestaltung und nicht zuletzt in der Stromrichterart [3].

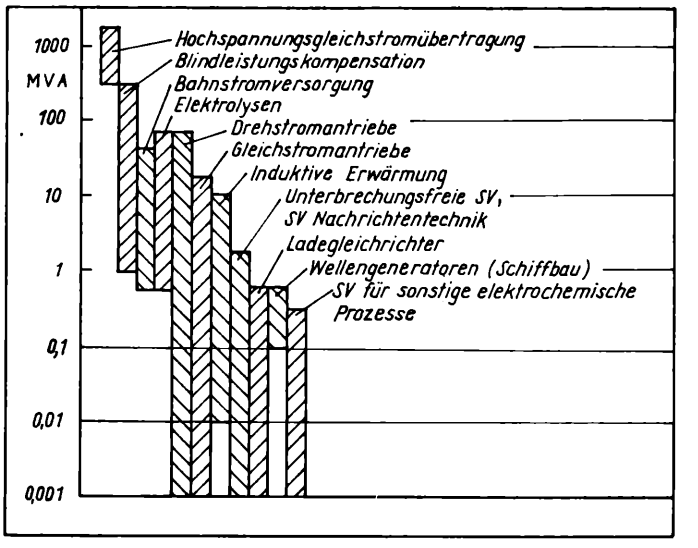


Bild 1. Durchgangsleistungen typischer Stromrichteranlagen bzw. Einzelaggregate *SV* Stromversorgung

Diese Typenvielfalt, die unter dem Einfluß einer hohen Halbleiterinnovation ständig wächst, erfordert die Vertiefung des arbeitsteiligen Herstellungsprozesses durch Einbeziehung unter anderem auch solcher Kombinate und Betriebe, die durch den sich vollziehenden Substitutionsprozeß von anderen Aufgaben entlastet werden bzw. wo sich engere Wechselbeziehungen zwischen Stromrichter und Verbraucher ergeben. Dieser Prozeß wird durch die Entwicklung und Bereitstellung von Spannungs-Frequenz-Umrichtern mit transistorisiertem Leistungsteil durch das Kombinat Elektromaschinen (KEM) besonders deutlich und die Ausweitung der Applikation von Thyristorblöcken z. B. für Stromwechselrichter durch das Kombinat Elektro-Apparate-Werke (KEAW) für den Finalproduzenten der thyristorisierten Umrichtertechnik KAAB.
Ausgangspunkt für die laufende und zukünftige Erzeugniserneuerung sind Anwenderforderungen, die für alle Stromrichterproduzenten gleichermaßen gelten. Sie und die dabei zu nutzenden Entwicklungsreserven zeigt Tafel 1. Daraus ist die dominierende Rolle der Zulieferindustrie und dabei vor allem der Einfluß der Halbleiterleistungsbauelemente und mit allerdings erheblichem Abstand auch der Schaltungsoptimierung und nicht zuletzt der Wärmeabführungsprobleme zu erkennen.
Von zentraler Bedeutung für energie- und massesparende Anwendung ist die Bereitstellung verlustarmer Bauelemente für Schaltfrequenzen von etwa 1 bis 50 kHz (Ausnahmefälle auch 100 kHz). Sie eröffnen auch Möglichkeiten zur Geräuschminimierung, zur Realisierung blindstromsparender Schaltung, Optimierung des Betriebsverhaltens und Verlusthaushalts Stromrichter — Motor und der Ablösung rotierender oder statischer Umformer mit Elektronenröhren bis in den HF-Bereich. Beispielsweise sind Masseeinsparungen um 50 % und mehr möglich, wenn Stromrichter mit großem Verhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangsspannungswert mit Transformator wie für Schweißgeräte mit Mittelfrequenz-Zwischenkreis realisiert werden. Volumen- und Masseminimierungen bei Transformatoren, Drosseln und Kondensatoren einer Stromrichteranlage sind von der momentan zu speichernden Energie, also von der Höhe der Schaltfrequenz abhängig. Auch Vereinfachungen von Filtern für Wechselrichter in USV-Anlagen sind schaltfrequenzabhängig möglich.
Grundlage der Strategie zur Weiterentwicklung des Erzeugnissortiments im Stammbetrieb des KAAB, des VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin, waren, wie folgende Beispiele verdeutlichen sollen, die ökonomischen Ziele zur Energie-, Masse- und Arbeitszeiteinsparung in Einheit mit der Befriedigung gewachsener Anwenderbedürfnisse (Tafel 1):

— Den Anforderungen an eine höhere Flexibilität bei der Anpassung an den Arbeitsprozeß nach lfd. Nr. 8. wurde u. a. durch die Entwicklung des Automatisierungssystems audatec entsprochen. In

Dipl.-Ing. *Helmut Kabisch* ist Direktor des Bereichs Stromrichter und Antriebe im Zentrum für Forschung und Technologie des VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin.

Tafel 1. Ziele und Wege zur Realisierung verbesserter Gebrauchswerte

Lfd. Nr.	Ziel: Verbesserung	Weg
1	Inbetriebnahme-, Bedien- und Servicefreundlichkeit	• Rechnereinsatz mit verbesserter Bedienkommunikation Fehler- und Betriebsanzeige und Betriebsanzeige und leichter Parametrierung • rechentechnische Simulation • Integration adaptiver, selbstanpassender Strukturen
2	Zuverlässigkeit	• begrenzte Redundanz, insbesondere (Reihen- und) Parallelschaltung Hauptventile und Software • Einsatz höherintegrierter Schaltkreise und Rechner • Funktionsintegration • Mikrorechner mit Selbsttest- und Diagnosefunktion • Fertigungstechnologie, Qualitätssicherung (Screening) • verbesserter Schutz gegen Überlastungen (U, J) • Sicherung EMC
3	Volumen/Masse-Leistungsverhältnis	• Erhöhung der Ventilleistung und Beschränkung der Reihen- und Parallelschaltung • Verlustminimierung (Beschaltung, vollsteuerbare und BE mit verbesserten Parametern) • Einsatz neuer Magnetika • verbesserte Wärmeabführung, Verkleinerung der Isolationsabstände auch bei hohem Schmutzanfall (Öl) • Einsatz HF-Zwischenkreis • Optimierung Motor für Stromrichterspeisung • Anwendung neuer Kühlverfahren (Wärmerohr, Öl, Wasser, Freon) und optimierter Ventilatoren • Mikrorechnereinsatz bei hohen Gebrauchswertforderungen • Funktionsintegration
4	Wirkungsgrad	• optimierte Ventilschutzbeschaltung in Verbindung mit hohen Sperrspannungen der Ventile und ZnO-Varistoren • Einsatz schnellschaltender verlustarmer Ventile (voll steuerbar) • optimierte Anlagengestaltung • Optimierung Motor — Stromrichter
5	Netzfreundlichkeit	• höherpulsige Schaltung (leistungsabhängig) bzw. steuerungsseitige Maßnahmen und Filter zur Verminderung/Verschiebung Oberwellenanteile • ventilseitige Blindstromkompensation (kapazitive bzw. auf cos $\varphi = 1$ geregelte Eingangsstromrichter im Umrichtersystem, Sektorsteuerung u.a.) • netzseitige (Vor-Ort) Kompensation, evtl. dynamisch mit Blindstromrichtern
6	Geräuschpegel (Stromrichter, Verbraucher)	• Verwendung von Schaltfrequenzen um 20 kHz • mechanisch verbesserter Aufbau • Einsatz geeigneter Kühlsysteme und Anlagenaufbau
7	Anpassung an spezifische Einsatzbedingungen	• auf geforderte Schutzgrade aufrüstbare Konstruktionen, mit ggf. 2-Kreis-Kühlsystem Luft/Luft, Luft/Wasser • Einsatz neuer Kühlsysteme (Öl, Freon, Wärmerohre) • Einsatz bromiertes Cevausit und Lackierung von Leiterplatten (DSRK) • Vermeidung mechanischer Resonanz durch konstruktive Maßnahmen im Innenausbau, schwingungsgedämpfter Aufbau (mech. Festigkeit)
8	Anpassung an Arbeitsprozeß	• Schaffung wiederverwendungsfähiger Systemkomponenten • effektive Vorbereitung mit CAD/CAM • flexible Anpassung durch Programmänderung des Mikrorechners im Stromrichter

mehreren größeren Industriekomplexen wurde der Nachweis der Betriebstüchtigkeit auch über mehrere Jahre erbracht [1].

— Ausgehend von den Möglichkeiten zur vollen Nutzung der Vorteile des Mikrorechnereinsatzes bei selbstgelöschten gepulsten Stromrichtern konzentrierte sich die Produktionsüberleitung auf Typenreihen USV-Stromrichter und Drehstromantriebe, so daß damit die Zielvorstellungen 1, 2, 3, 7 und 8 produktionswirksam umgesetzt wurden. Durch im wesentlichen nur softwareseitige Anpassungen wurden Varianten für gesteuerte Pumpen, allgemein geregelte Antriebe, Zentrifugen, Flyer (Textilindustrie) realisiert.

— Die bewährten Stromrichter mit Luft/Luft- und Wasser/Wasser-Kühlung werden durch ölgekühlte ergänzt. 30 bis 50% Volumeneinsparungen und Erfahrungen mit diesen und anderen Kühlsystemen rechtfertigen die Entwicklungsaufwendungen und tragen den Anwenderbedürfnissen nach lfd. Nr. 3 und 7 Rechnung.

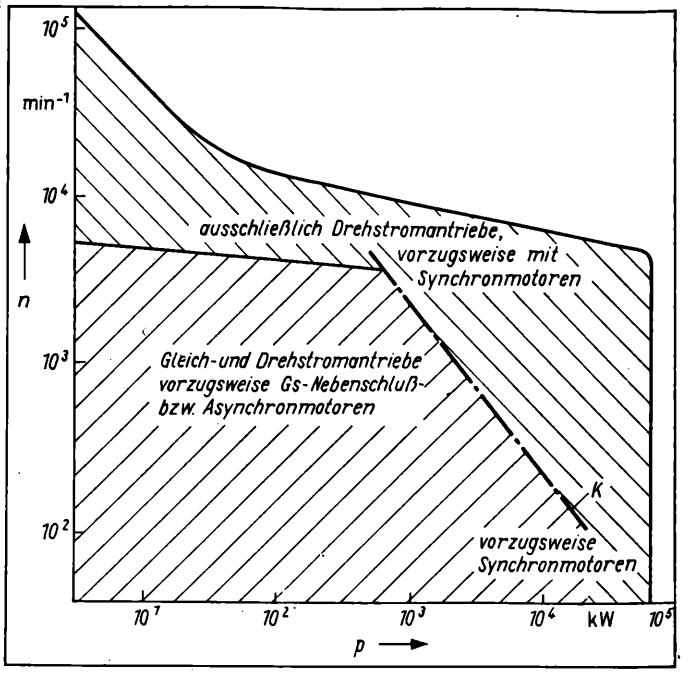


Bild 2. Drehzahlen und Leistungen industriell eingesetzter Elektroantriebe mit Drehzahlverstellung (perspektivisch)
K theoretische Kommutierungsgrenzen für Gleichstrommaschinen

— Bei Drehstromantrieben wurden Forderungen auf höhere Schutzgrade, optimale Anpassung Motor — Stromrichter und ein cos φ nahe 1 entsprechend lfd. Nr. 3 bis 5 verwirklicht.

— Eine höhere Energiequalität ist darüber hinaus durch die Anwendung höherphasiger Schaltungen, Filter und (für Sonderfälle) durch Pulsstromrichter mit der Möglichkeit kapazitiver Blindleistungsentnahme gesichert.
Für umfangreichere Stromrichteranlagen, z.B. für Walzwerke, ist eine indirekte Blindstromkompensation aus Kondensatorenbatterie, Saugkreis und stetig verstellbarer induktiver Belastung (Stromrichter) die z.Z. ökonomischste Lösung. Leistungen bis 2×4 MVar wurden realisiert, 16 MVar projektiert.

— Im Rahmen der Neuentwicklung der Serienstromrichter für Gleichstromverbraucher (vorzugsweise Antriebe) zwischen 3 und 300 kW wurde unter Nutzung der Fortschritte der Mikroelektronik und neuer Halbleiterleistungsbauelemente eine partielle Schutzgraderhöhung auf IP 43 nach lfd. Nr. 7 gesichert und das Verhältnis Leistung/Volumen bzw. Leistung/Masse um bis zu 67 bzw. 30% nach lfd. Nr. 3 verbessert. Erhöhte Sperrspannungen bei Modulen und Ventilen ermöglichen weitere Verlustreduzierungen, transformatorlose Netzanschlüsse für 500 und ggf. 660 V und Reduzierung des Ventilaufwandes bei Stromrichtern über 1000 V Ausgangsspannung. Unter anderem stehen nun auch Wechselstromsteller für Elektrofilter, deren Bedeutung im Umweltschutz ständig wächst und Gleich- und Drehstromantriebe in raumsparender Kompaktbauweise für 500-V-Netzanschluß zur Verfügung. Damit wurden Verbesserungen in Richtung der unter lfd. Nr. 2, 3, 4 und 7 genannten Ziele erreicht.

— Zur Erfüllung der Anforderungen des Schiffbaus wurden den DSRK-Vorschriften entsprechende Ausrüstungen (Zielvorstellung lfd. Nr. 7) geschaffen. Neben Leistungseinheiten aus der DTO-Serie zur Speisung kleinerer Winden, Querstrahlruder und zur Maschinenerregung wurde die Anwendung inzwischen auf leistungsstarke Einheiten bis in den MW-Bereich für Kurrleinenwinden- und Propellerantriebe erweitert. Zunehmend sind umfangreiche Regeleinrichtungen integriert, um spezifische technologische oder mit dem wechselnden Energieangebot zusammenhängende Aufgaben zu lösen und stabile Betriebsbedingungen z.B. auch bei langen Wellen (Torsionsschwingungen) sicherzustellen.

— In der Systematisierung des Erzeugnissortiments wurde, beginnend bei Gleichstromantrieben, eine neue Qualitätsstufe erreicht und produktionswirksam umgesetzt. Für die Konstruktion, elektrische Dimensionierung, Simulation und ausgewählte Projektierungsanteile wird im weiten Umfang die Rechentechnik eingesetzt. Der Übergang auf ein geschlossenes CAD-System zur Dimensionierung und Simulation ist vorbereitet und seine Elemente werden seit 1987 zunehmend genutzt [2] [3].

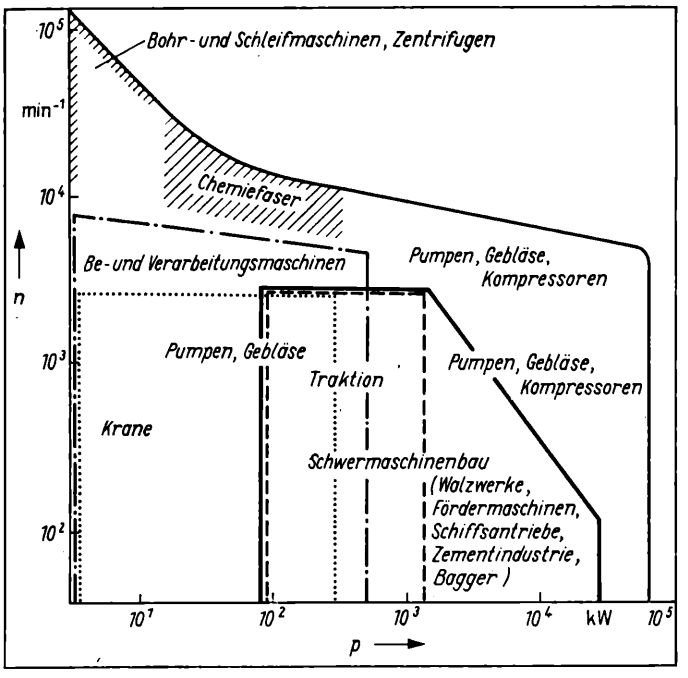


Bild 3. Nennleistung P (Traktion, Walzwerke installierte Leistung) und Drehzahl für wichtige Anwendungsgebiete stromrichtergespeister Antriebe

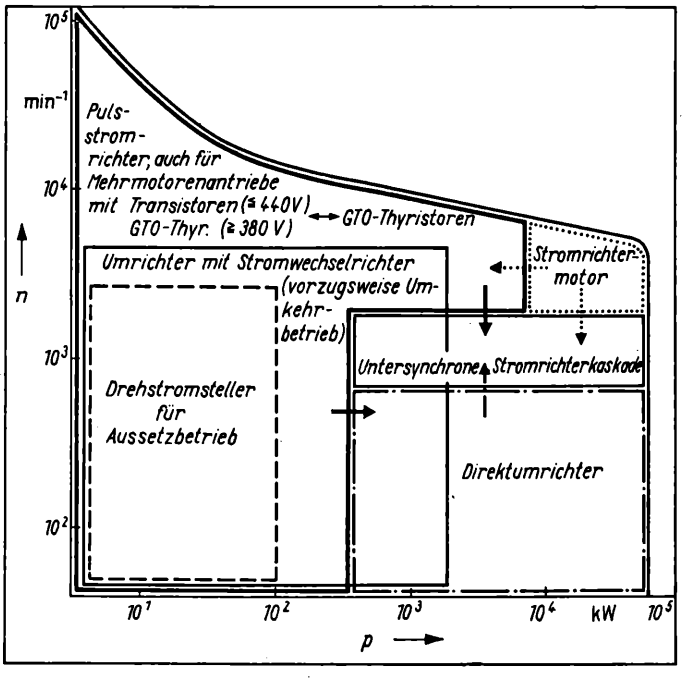


Bild 4. Anwendung von Drehstromantriebssystemen in Abhängigkeit von Drehzahl-Leistungsanforderungen. Die Überdeckung in Teilbereichen ist nur in Ansätzen angedeutet.

3. Drehzahlverstellbare Stromrichterantriebe

Aus den Bildern 2 und 3 lassen sich Anforderungen an Nennleistung und -drehzahl für industrielle Antriebe in charakteristischen Anwendungsgebieten sowie die eingeschränkte technische Realisierbarkeit mit Gleichstrommotoren infolge der Kommutierungsgrenze erkennen. Die unbestreitbaren Vorteile der Gleichstromantriebstechnik (einfacher standardisierter Stromrichteraufbau und hoher Wirkungsgrad, hervorragendes Regelverhalten mit einfachen Schaltungsstrukturen durch prinzipbedingt maschinenseitige Entkopplung Anker und Feld) und die auch dieser Technik zugute kommenden Innovationen (Verbesserung der Bürstenstandzeiten und rationellere Fertigungsmethoden z.B. für Roboterantriebe des VEB Niles, Dresden, Einsatz von Mikrorechnern und verbesserten leistungselektronischen Bauelementen) lassen die Vorhersage zu, daß ihre volkswirtschaftliche Bedeutung in den nächsten Jahren weitgehend erhalten bleibt. Preisgleichheit bzw. -vorteile zugunsten drehzahlverstellbarer Drehstromantriebe gibt es z.Z. für einzelne Gebiete. Der derzeitige Produktionsumfang für Gleichstromantriebe ist davon auch international z.Z. offensichtlich noch nicht beeinflußt. Mit Erweiterung der maximalen Drehzahl auf über 6000 min^{-1} und große Feldschwächebereiche sowie neue Drehzahlgeber trägt die Entwicklung der Gs-Motoren international den Bedürfnissen des Werkzeugmaschinenbaus Rechnung. Die DDR-Industrie verwirklicht diese Entwicklung durch Umsetzung der Direktive zum laufenden Fünfjahrplan, die jährliche Steigerungsraten von 25% vorgibt.

Der Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeit für industriell eingesetzte Stromrichter und Antriebe liegt wie in den Vorjahren bei Drehstromantrieben. Die auch mit „vollsteuerbaren" (also über die Steuerelektrode auch löschbaren) leistungselektronischen Bauelementen (gegenwärtig insbesondere GTO und Transistoren) und Mikrorechnern erzielbare weitere Aufwandsreduzierung führt zu noch flexibler anpaßbaren und zuverlässigeren Lösungen vor allem auf dem Gebiet der Antriebstechnik.

Während die Gleichstrom-Gerätetechnik im wesentlichen mit nach Leistung abgestuften Stromrichter-Brückenschaltungen realisierbar ist, erhöhte sich mit Einführung der Drehstromantriebstechnik die Typenvielfalt ökonomisch und technisch begründet beträchtlich. Bild 4 zeigt, daß mit der Bereitstellung netzanschlußfähiger hochsperrender Transistoren für Einrichtungsantriebe eine gleichwertige Standardisierung im unteren Leistungsbereich, vorzugsweise für Einrichtungsbetrieb, erreicht werden kann. Für die „schwere" Antriebselektronik bleibt es bei mehreren aus dem speziellen Antriebsproblem komplex technisch-ökonomisch begründet ableitbaren Varianten:

— Unterschiedliche Stromrichter-Wirkprinzipien (Umrichter ohne Zwischenkreis; Zwischenkreisumrichter mit gesteuertem bzw. ungesteuertem Gleichrichter und Wechselrichter mit kombinierter Frequenz- und Ausgangsspannungsverstellung bzw. mit Ausgangsspannungsverstellung über zwischengeschaltete Gs-Steller) [4] [5]. In der Literatur werden unter dem Einfluß der Bauelementeentwicklung ständig neue Schaltungen gezeigt [6] [7].

— Unterschiedliche Löschprinzipien, aufbauend auf breitem Spektrum verfügbarer Leistungsbauelemente, deren Kosten- und technische Entwicklung nicht eindeutig vorher bestimmbar ist [asymmetrisch sperrende Thyristoren mit und ohne GATT-Struktur, rückwärtsleitende Thyristoren, schnell und mittelschnell schaltende Thyristoren, hochsperrende bipolare Transistoren bzw. demgegenüber sperrspannungsreduzierte Isolated Gate Bipolare Transistoren (IGBT)] [8].

— Unterschiedliche Eignung der Grundschaltungen für Einquadranten- und Mehrquadrantenantrieb (Aufwandsvorteile für Stromwechselrichter gegenüber leistungsfaktoroptimierten Pulsumrichtern mit eingangsseitigem Diodenstromrichter).

— Begrenzte Eignung von Umrichtern mit Stromzwischenkreis für für am gleichen Ausgangsnetz angeschlossene Mehrmotorenantriebe. Einsatz von Synchron- bzw. Asynchronmotoren für unterschiedliche Gleichlaufgenauigkeitsanforderungen.

— Unterschiedliche Informationssysteme für gesteuerte Drehstromantriebe (ohne Rückführung) bzw. für langsam wirkende Regelungen (Drehzahl, Volumenstrom bzw. andere verfahrenstechnische Größen) einerseits und hochdynamische, dem Verhalten von Gleichstromantrieben gleichwertige Antriebe mit feldorientierten Steuerungen, die eine voneinander unabhängige und schnelle Einstellung von drehmomentbildendem Maschinenstrom und Fluß sichert. Während die vereinfachte Ausführung den Anforderungen für Pumpen, Lüfter, Förderbänder u.a. genügt, sind dynamisch hochwertige Strukturen zur schnellen Ausregelung von Laststößen und Führungsgrößenänderungen insbesondere für werkzeugmaschinenspezifische Haupt- und Vorschubantriebe, für Traktions-, Walzwerks- und Fördermaschinenantriebe erforderlich.

Vor allem im Bereich hoher Antriebsleistungen wurde ein Substitutionsprozeß in folgenden Richtungen eingeleitet:

— Gleichstromantriebe im MW-Bereich lassen sich unter Berücksichtigung der Aufwendungen für das gesamte Investitionsvorhaben (kleinere Motorenlänge, Verzicht auf aufwendige Doppelmotorlösungen, Reduzierung Bauaufwand für Fundament und Gebäude) und der laufenden Kosten (Wartung Bürstenapparat, Wirkungsgradverbesserung 3 bis 4% u.a. durch reduziertes Trägheitsmoment) durch drehzahlverstellbare Antriebe vorzugsweise mit Synchronmaschinen ablösen.

— Durch getriebearme bzw. getriebelose Anpassung der Motordrehzahl an die unmittelbar von der Arbeitsmaschine geforderte optimale Drehzahl lassen sich Material- und Energieeinsparungen vor allem im Bereich von Pumpen- und Lüfterantrieben erreichen, die

im Zusammenhang mit anderen prozeßspezifischen Vorteilen die erheblichen Mehraufwendungen für Arbeitsmaschine, Stromrichteranlage und angepaßte Sondermotoren ökonomisch rechtfertigen. Das gilt insbesondere für langsam- oder schnellaufende Einzelantriebe, letztere in Verbindung mit Ablösung der verlustbehafteten Volumenstromverstellung durch Drehzahlanpassung.
Selbstverständlich sind getriebearme Mehrmotorenantriebe mit unterschiedlichen Drehzahlen von diesem Substitutionsprozeß nicht ausgenommen, wobei das allein wie in den meisten anderen Fällen nicht die Mehraufwendungen der Drehstromantriebstechnik rechtfertigt. Sofern nicht spezielle Schutzgrade bzw. Drehzahlen den Einsatz der Drehstromantriebstechnik erfordern, stellen aber Gs-Antriebe ggf. eine ökonomisch vertretbare Lösung dar (Druck- und Textilmaschinen u.a.).
Im VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin liegen Erfahrungen mit Pulsumrichtern, Umrichtern mit Stromwechselrichter und mit Stromrichterkaskaden bis in den MW-Bereich vor. Die bei Pumpen eingeleiteten Substitutionsprozesse konzentrieren sich auf Heizkraftwerke, Klär- und Wasserwerke. Durch Verwendung des Pulsstromrichters mit ungesteuertem netzseitigem Gleichrichter konnte im Leistungsbereich bis 100 kVA und durch Kombination der untersynchronen Stromrichterkaskaden mit Kompensationseinrichtungen nach [10] das Blindleistungsproblem bis zu 2 MW gelöst und damit gleichzeitig ein Beitrag zur besseren und verlustreduzierten Energieübertragung geleistet werden.
Die neuen Qualitätsmerkmale drehzahlverstellbarer Antriebe erfordern auch motorseitige Veränderungen, da der „genormte Asynchronmotor" nur für begrenzte Anwendungsgebiete geeignet ist. Neue, mit dem jeweiligen Stromrichterwirkprinzip abgestimmte Motorkennwerte wie Streureaktanz und Geräuschpegel in Funktion der (optimierten) Frequenzen sowie Verlustminimierung und Wärmeabführung, aber nicht zuletzt auch Motordrehzahlen von 100 bis 200000 min^{-1} und Stabilitätsprobleme bei Grenzleistungsantrieben erfordern umfangreiche Systemoptimierungen. Diese Tendenz bleibt nicht ohne Auswirkung auf die Stromrichternormung. Die in der IEC (TC 22) laufende Normenarbeit zeigt mit dem Begriff „adjustable speed drives" wie auch die Normenarbeit im Rahmen von INTERELEKTRO die Grenzen der allein auf Stromrichter orientierten Normenarbeit. Auch für Stromrichter im Bereich der Traktion, der Batterieladung, der USV, im Schiffbau, bei Bearbeitungs- und Verarbeitungsmaschinen u.a. sind abweichende Vorschriften bzw. zusätzliche Bedingungen zu beachten.

4. Mikrorechner-Einsatz [11]

Neue Entwicklungsziele (Tafel 1) beschleunigen den Einsatz von Mikrorechnern im stromrichter- und antriebsnahen Bereich alternativ zu den für viele Anwenderforderungen ausreichenden und bewährten Regelungen in Analogtechnik. Bereits die analog arbeitende Signalverarbeitung — gekoppelt mit freiprogrammierbaren stromrichter- und antriebsnahen Steuerungen — ermöglichte die problemlose Einbindung des Stromrichters als „intelligenten Aktor" in komplexe Automatisierungsanlagen, für Walzwerke, Bagger und andere industrielle Anwendungen des KAAB. Der Einsatz schneller Mikrorechner im antriebs- und stromrichternahen Bereich ermöglicht die Entlastung übergeordneter Automatisierungseinrichtungen verbunden mit einer übersichtlichen Automatisierungsstruktur und Verfügbarkeitserhöhung. Mit Integration weiterer Regelungs-, Überwachungs-, Schutz-, Adaptions-, Diagnose-, Optimierungs- und Vorverarbeitungsaufgaben sowie spezieller technologischer Aufgaben wird der Trend zu autarken Stromrichtereinheiten anhalten. Einbezogen sind vor allem die technologischen Aufgaben, die sich durch Verarbeitung physikalischer Größen des Stromrichters oder Antriebs realisieren lassen.
Die internationale Entwicklung zeigt, daß zur Lösung dieser Aufgabe eine auf die Anforderungen der Stromrichter- und Antriebstechnik orientierte Leittechnik notwendig ist, wobei sich mindestens zwei Klassen herauskristallisieren:

1. Auf eine Typenreihe serienmäßig gefertigter, von Stromrichtern angepaßte und damit vielfach auf ein ausgewähltes Stromrichterwirkprinzip beschränkte Informationselektronik mit 8- bzw. 16-bit-Rechnern.
Kennzeichen dieser aufwandsminimierten Klasse sind einfache kundenseitige Parametrierung der Firmware ohne aufwendiges Programmiergerät, auf den jeweiligen Anwender zugeschnittene Anpaßbarkeit und vielfach auch die Integration in das kompakt aufgebaute Stromrichtergerät.
Mit solchen Strukturen liegen im KAAB z.B. für USV (Wechselrichter und Gleichrichter) sowie gesteuerte und geregelte Thyristorumrichter gute Erfahrungen vor. Sie sind ein erster Schritt auch für den Betreiber von Stromrichtergeräten, sich mit neuen Konzepten zur Kommunikation (Bedienung, Diagnose-, Betriebsdaten- und Fehleranzeige) vertraut zu machen.
Der Entwicklungstrend zu schnellen 16-bit-Rechnern, -Prozessoren und -Controller führt in dieser Aufgabenklasse zu Einkartenrechnern. Sie realisieren auf einem höheren Leistungsniveau Standardfunktionen der stromrichter- und antriebsnahen Ebene und die bekannten Ansteuer- und Regelstrukturen.
2. Für Mehrmotorenantriebe, komplexe Stromrichteranlagen, größere technologiespezifische Aufgaben eines Einzelantriebes bzw. kompliziertere Strukturen wird eine projektspezifische anpaßbare Leittechnik notwendig. Sie wird u.a. für umrichtergespeiste Drehstromantriebe hoher dynamischer Anforderungen und/oder großer Leistung auf Grund komplizierter Regelstrukturen, Stabilitätsprobleme und Schutzfunktionen zweckmäßig sein. Die durchweg mit 16-bit-Rechnern vorbereiteten bzw. ausgeführten Stromrichter und Antriebe decken alle Anforderungen der Prozeßautomatisierung ab und sind sowohl Bestandteil komplexer Anlagenlösungen als auch relativ selbständig arbeitender Stromrichteranlagen. In dieser Klasse dominieren gegenwärtig auf spezielle Anwendungen ausgerichtete Lösungen z.B. für die Metallurgie oder für Traktionsanwendungen. In Einzelfällen zeichnen sich aber auch für breitere Anwendungsbereiche der Stromrichter- und Antriebstechnik universelle Lösungen ab. Die in der Spitzenklasse auf Realisierung projektierungsfreundlicher (bildschirmgestützt und dialoggeführte, ohne spezielle Rechnerkenntnisse durch den Projektanten handhabbare) standardisierte Technik ist durch ein erweiterungsfähiges und damit flexibel anpaßbares Konzept gekennzeichnet, das eine volle Integration mit übergeordneten Leitsystemen einschließlich 32-bit-Technik ermöglicht und beispielsweise die Einbeziehung redundanter, fehlertolerierender und damit hoch zuverlässige informationselektronische Lösungen oder adaptiver, selbstanpassender Regelstrukturen offen hält.
Die Einführung der Mikrorechentechnik ist mit der Neubestimmung von Trennstellen sowohl zwischen Rechner und der übrigen ventilnahen Informationselektronik (VNE) als auch zu übergeordneten Automatisierungseinrichtungen verbunden. Dabei kommt der VNE die Aufgabe zu, die potentialgetrennte, auf das jeweilige Stromrichterwirkprinzip orientierte Signalaufbereitung und anwendungsspezifische Forderungen zu realisieren. Gegebenenfalls ist ein vom Mikrorechner unabhängiger Schutz in die VNE zu integrieren.
Für beide Systeme ist die Arbeit im Hierarchieverband über standardisierte Schnittstellen sicherzustellen. Neben dem innerhalb des Kombinats Automatisierungs- und Anlagenbau zu garantierenden Zusammenspiel mit dem Automatisierungssystem audatec gilt das langfristig auch für die Zusammenarbeit im Rahmen lokaler Netze (LAN) zur Realisierung automatisierter rechnerintegrierter Betriebe (CIM). Für werkzeugmaschinenspezifische Antriebe ist die Frage zu beantworten, wie sich mit dem Übergang auf Mikrorechnerregelungen die Schnittstelle zur CNC gestaltet (Digitalschnittstelle, Integration der Drehzahlregelung und/oder Lageregelung in den Antrieb oder die übergeordnete (numerische) Steuerung].

5. Funktionsintegration

Neben Zuverlässigkeitserhöhung und Aufwandsreduzierung ist die einfache Implementierung neuer Konzeptionen mit höheren Gebrauchswerteigenschaften in vorhandene Gerätesysteme ein wichtiges Argument für die hybride bzw. monolithische Funktionsintegration. Mit der Bereitstellung potentialfreier Module mit Zweigthyristoren/-dioden und Leistungstransistoren mit Freilauf- und Speed-up-Dioden bzw. Antisättigungsbauelementen und weiteren Schutzeinrichtungen ist ein erster Schritt getan. Die folgerichtige Entwicklung, Einbindung (kundenspezifischer) Schaltkreise für intelligente Schutz- sowie Steuer- und Regelfunktionen und optoelektronische Potentialtrennung, ist ein wichtiges perspektivisches Anliegen.
Die derzeit produktionstechnisch beherrschbaren Technologien schränken die monolithische Integration vor allem hinsichtlich beherrschbarer Spannungen und (Verlust-)Leistungen ein. Damit sind Schaltkreise im Bereich der Nachrichten-, Auto-, Kleinstantriebselektronik, letztere bereits bis 220 V Netzspannung unterhalb 0,5 kW, konzipiert [11]. In der industriell genutzten Leistungselektronik hat diese Entwicklung auf absehbare Zeiträume für intelligente Sensoren, elektronische Vorverarbeitung (Signalanpassung) Potentialtrennung/Verstärkung der Signale im Bereich der ventil- und

antriebsnahen Automatisierungskomponenten zur direkten Anpassung an Mikrorechnereingang, zur AC/DC-Wandlung (ausgeführt 100 V/5 V und 10 A), für Netzteile und dergleichen Bedeutung. Die Ausweitung monolithisch integrierter Strukturen auf den Kilowatt-Bereich ist thermisch begrenzt und beeinflußt die Zuverlässigkeit (Reduzierung auf 50 % bei 10 °C Temperaturerhöhung) [12].

Demgegenüber wurden im Leistungsbereich von wenigen Kilowatt Stromrichter für industriellen Einsatz durch hybride Integration der Informationselektronik und auf Keramiksubstraten potentialfrei angeordneten Leistungshalbleiter in neuartiger Kompaktbauweise realisiert. Durch Aluminiumoxidsubstrate, die beidseitig mit Kupferdioden versehen sind, lassen sich nicht nur die Probleme Isolation (bisher nur bis 1600 V) und Wärmeabführung druckkontaktlos bis 250 A beherrschen, sondern auch komplette Leistungsteile mit bekannten Ätzverfahren „verdrahten". Die Verfolgung einer solchen Grundlinie ist nur bedarfsabhängig zu entscheiden und muß die technologischen Möglichkeiten ebenso berücksichtigen wie ein mögliches Eindringen der Mikrorechentechnik in diese Anwendungsbereiche. Für den Anwender ergäbe sich der Vorteil, durch Verkleinerung bisher gefertigter Stromrichtereinheiten soviel Platz zu gewinnen, daß im bisher benötigten Volumen ein anschlußfertiger drosselloser Stromrichter untergebracht wird.

Andere Wege der Funktionsintegration eröffnen Schaltungskonzepte, die eine Nutzung einzelner Elemente für mehrere Funktionen zulassen. Beispielsweise lassen sich Überlast-, Kurzschluß- und Durchzündungsschutzfunktionen eines mechanischen Schalters auch elektronisch mit einer praktisch verzögerungsfrei wirkenden Löschschaltung des Stromrichters realisieren. Werden mehrere, getrennt geschützte Verbraucher über einen Stromrichter mit elektrischer Energie versorgt, so läßt sich eine Aufteilung in eine leistungsstarke Brückenhälfte zur Gleichrichtung der Energie für alle Verbraucher nutzen, während jedem einzelnen Verbraucher eine leistungsschwächere zweite Brückenhälfte zugeordnet wird. Durch die zwangsweise Löschung des Ventilstromes einer Brückenhälfte ist ein zuverlässiger Schutz ohne mechanischen Schalter gewährleistet. Ein solches Konzept läßt sich vorteilhaft in Stromversorgungsanlagen für Gleichstrombahnen realisieren.

6. Konstruktiv-technologische Entwicklung

Die hohe Sortimentsbreite der Stromrichtertechnik mit unterschiedlichen Grundschaltungen (Stromrichterwirkprinzipien), Leistungsspektren bis zu einigen ...zig Megawatt und Mittelspannung (Höchstspannungsanlagen seien ausgeklammert) und an die jeweiligen Umgebungsbedingungen angepaßte Kühleinrichtungen erfordern eine von Einzel- bis zur Serienfertigung flexibel anpaßbare, erzeugnisspezifisch unterschiedliche Technologie für Leistungsteile und Fertigerzeugnisse. Voraussetzung für eine wirtschaftliche Vorfertigung ist ein weitgehend vereinheitlichtes Sortiment von Konstruktionselementen und die Auflösung umfangreicherer Leistungsteile in Baugruppen wie beispielsweise Phasenbausteine. Systematisierung der einzelnen Komponenten zur Erhöhung des Wiederholgrades in der Fertigung und gleichzeitigen projektspezifischen Applikation der leistungs- und informationselektronischen Baugruppen erfordert aufeinander abgestimmte Schnittstellen. Einheitliche Geometrie und Prüftechnik sind Grundlage für eine an hohen Stückzahlen orientierte automatisierte Fertigung der stromrichterorientierten Informationselektronik.

Die Stromrichterkonstruktion wird anhaltend durch spezielle Einbaubedingungen „vor Ort" (z. B. in Lokomotiven oder im Fuß einer Werkzeugmaschine) beeinflußt und durch materialsparende Kompaktbauweisen unter Nutzung der Schaltungsintegration (z. B. Einsatz potentialfreier Stromrichtermodule, deren Einsatz z. Z. auf etwa 250 A und 1600 V begrenzt ist) [12]. Mit der Einführung selbstgelöschter Schaltungen, Mittelfrequenzanwendungen und der Beherrschung im µs-Bereich ablaufender Kommutierungsvorgänge müssen Streuinduktivitäten und -kapazitäten berücksichtigt werden. Das erfordert z. B. kurze Verbindungen zu Kommutierungs- und TSE-Elementen, spezielle Leitungsführungen unter Beachtung magnetischer Werkstoffe (z. B. Traversen), spezielle Abschirmmaßnahmen und auch Einsatz induktivitäts- bzw. kapazitätsarmer Bauelemente. Der Einsatz neuer, schnellschaltender Leistungsbauelemente stellt neue Anforderungen an die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Leistungselektroniker und Entwicklungskonstrukteur, um die Einkopplung elektromagnetischer Störungen zu vermeiden und die Funktion unter den unterschiedlichsten Netz-, Einbau- und Betriebsbedingungen sicher zu gewährleisten. Da Schmelzsicherungen keinen zuverlässigen Schutz ermöglichen, muß die

Tafel 2. Probleme und Möglichkeiten zur Verbesserung abschaltbarer Thyristoren

Lfd. Nr.	Problem	Maßnahme	Ziel
1	hoher Ansteueraufwand	Integration Hochstrom-Niedervolt-MOS-Gates analog IGBT und Lichtzündung analog Netzthyristoren	Reduzierung Ausschaltstrom um etwa 2 Größenordnungen, Potentialtrennung
2	großer Schutzkondensator	Erhöhung dynamische Festigkeit und Reduzierung Spannungsspitzen (durch kleineres di/dt) mit verbesserter Halbleitertechnologie	Verkleinerung um 50 %
3	Verlustreduzierung	Einsatz asymmetrischer GTO	Reduzierung Durchlaßspannungsabfall, kleiner Sperrstrom
		schnellschaltende Diode, induktivitätsarmer Aufbau der Beschaltung, kleines C nach lfd. Nr. 2	minimierte Beschaltungsverluste
4	Frequenzgrenze 1 kHz	Reduzierung Speicherzeit durch aus der Mikroelektroniktechnologie bekannte feinere (Katoden-)Struktur und o. g. Maßnahmen	mehrere kHz
5	ausnutzbarer Nennstrom	Reduzierung Speicherzeit nach 4 zur Beschleunigung Ventilsperrung (Schutz bei Störung)	verbessertes Verhältnis zu (nutzbaren) Nennstrom
6	Leistungserhöhung	Sicherung Parallelschaltbarkeit von Ventilen und/oder Erhöhung der Scheibendurchmesser (über 60 mm Dmr. Aufrechterhaltung der Reihenschaltbarkeit auch bei höheren Frequenzen, Verbesserung der Wärmeabführung (z. B. Tablette in Kühldose integriert	Abdeckung des gesamten Leistungsspektrums im Frequenzbereich insbesondere für Antriebe

Tafel 3. Verlustkomponenten für 450-kVA-Umrichter (nach Untersuchungen aus der UdSSR)

Verlustquelle	Verlustanteile (kW) für diverse Umrichterschaltungen		
	gesteuerte Eingangsspannung	Pulswechselrichter GTO	schnelle Thyristoren
Kommutierungskreis	7,5	14,8	69,0
Bauelemente im Leistungskreis	6,3	10,4	20,0
Drosseln im Leistungskreis	5,5	4,9	5,8
übriger Leistungskreis	3,8	3,5	2,8
Ansteuerung, Kühlung	1,9	3,9	2,4
Summe	25,0	37,5	100

rechtzeitige Erfassung sich ausbildender Kurzschlußströme oder thermischer Überlastungen und die Abschaltung des Ventils vor Erreichung des Abschaltstromes (GTO) bzw. I_{csat} (Transistoren) gesichert werden.

Nicht zu unterschätzen sind auch die Probleme, die sich thermisch, fertigungstechnologisch und vom Materialeinsatz bei neuen Kühlmedien ergeben. Das gilt sowohl für Öl- als auch Fremdkühlung. Der Einsatz von Wärmerohren (heat pipes) erfordert Elemente hoher Langzeitdichtigkeit, um hochzuverlässige Stromrichter realisieren zu können.

7. Ausblick

Die Entwicklung der Leistungselektronik ist auch für die nächsten Jahre durch hohe Innovations- und zweistellige Zuwachsraten, die denen der übrigen Schlüsseltechnologien entsprechen, gekennzeichnet. Stromrichteranwendungen zur verlustarmen Umformung und/oder Steuerung elektrischer Energie weiten sich unter Nutzung neuer Bauelementeeigenschaften auf bisher wirtschaftlich nicht oder nicht voll genutzte Gebiete aus. Mit den z. Z. insbesondere für Netz-

Tafel 4. Perspektivischer Einsatz aktiver Leistungselemente (Tendenz)

Bauelement	bevorzugte Stromrichteranwendung	BE-Richtwerte (nicht kombinierbar) Sperrspannung kV	Strom kA	Schaltfrequenz kHz
MOSFET, IGBT	*U/f*-Umrichter und USV kleiner Leistung 220/380-V-Anschlußspannung, geräuscharme Kleinantriebe. $P < 10$ kVA	0,5 bis 1	$< 0{,}1^1)$	100
Bipolare Leistungstransistoren	*U/f*-Umrichter, USV und Stromrichter mit MF-Zwischenkreis mittlere Leistung 380/500/660-V-Anschlußspannung; einige 100 kVA	1,2 bis 1,6	$0{,}4^1)$	10 (20)
GTO	*U/f*-Umrichter großer Leistung und hoher Drehzahl	1,6 bis 5	$2^2)$	5
RLT	Serien- und/oder Parallel-Schwingkreisumrichter zur induktiven Erwärmung. Stromrichter mit MF-Zwischenkreis	1 bis 3	0,2 bis 0,8 $(I_T)^3)$	20 bis 50
mittelschnelle Thyristoren (t_q etwa 100 µs)	*U/f*-Frequenzumrichter mit Gleichstromzwischenkreis einschl. Stromrichtermotor für Antriebe bis max. 8000 min^{-1}	2 bis 5	1 bis $2^2)$	0,1 bis 0,2

[1]) I_c
[2]) Abschaltstrom, Dauerstrom etwa 1/3
[3]) Dauergrenzstrom

löschung gefertigten Siliziumelementen mit 100 mm Durchmesser und 5,5 kV Sperrspannung ist noch keine technologisch unüberwindbare Barriere errichtet. Aufwandsreduzierungen und Bewältigung noch größerer Leistungen mit Mittelspannungsstromrichtern sind ein wesentlicher Anreiz zur Entwicklung neuer Bauelemente.

So kann z.B. durch verbesserte GTO nach Tafel 2 bei aus dem Gs-Fahrleitungsnetz gespeisten Drehstromtraktionsantrieben mit hochsperrenden GTO-Wechselrichtern auf vorgeschaltete Gs-Steller verzichtet werden, und auch die Abdeckung weiter Anwendungsbereiche der schweren Antriebselektronik durch verbesserte Pulsumrichter ist möglich. Welche Bedeutung dabei der Senkung innerer Verluste zukommt, zeigt Tafel 3. Mit verbesserten Ventilen dürften sich die Verluste des mit GTO bestückten Pulsumrichters der mit gesteuertem Gleichrichter ausgerüsteten Variante annähern. Gleichfalls wird damit die bisher von einzelnen Herstellern als energieoptimal bezeichnete Pulsumrichterschaltung mit herkömmlichen schnellen Hauptthyristoren und GTO-Löschventilen durch GTO-Hauptventile auf Grund des im ganzen Steuerbereich guten Wirkungsgrades und des geringeren Aufwandes in Frage gestellt.

Mit der Weiterentwicklung der Leistungstransistoren könnten auch Stromrichter für transformatorlosen Anschluß an 660-V-Netze bei Leistungen von einigen hundert Kilowatt möglich werden. Geringore Verluste und Geräuschentwicklungen, verbunden mit Pulsfrequenzen bis 20 kHz haben zwischenzeitlich dazu geführt, daß auch abschaltbare Thyristoren z.B. für Drehstromantriebe im unteren Leistungsbereich abgelöst wurden. Unter Berücksichtigung der Entwicklung parallelschaltbarer hochsperrender Transistoren dürften abschaltbare Thyristoren vor allem für Sperrspannungen ab 1,6 kV und Abschaltströme ab 0,8 kA für die längerfristige Perspektive von Bedeutung sein.

Eine Ablösung der Vielfalt leistungselektronischer Bauelemente durch voll steuerbare Transistoren und GTO ist u.a. ein Kostenproblem, denn die aktive stromführende Fläche sinkt durch komplizierteren Aufbau, die Überlastfähigkeit ist reduziert und die innere Verbindungstechnik ist komplizierter. Die z.Z. auch für perspektivische GTO abschätzbare obere Frequenz bildet eine weitere Einsatzgrenze, so daß die Entwicklung zunächst nach der in Tafel 4 dargestellten Tendenz verlaufen könnte. Nicht berücksichtigt wurde der denkbare Ersatz von Netzthyristoren durch vollsteuerbare Ventile. Damit wäre z.B. für alle Gleichrichter und Umrichter mit gesteuertem Eingangsgleichrichter eine Steuerung auf $\lambda \approx 1$ mit allerdings hohem Aufwand möglich.

Parallel dazu erschließt die Schaltkreisintegration neue Entwicklungslinien. Darüber hinaus gewinnen Stellantriebe und Leistungsverstärker mit integrierter Informationselektronik vor allem Bedeutung in Konsumgütern, für Videocorder und in der Autoelektronik, wobei hohe Stückzahlen die technologische Entwicklung für Anwendungen im Bereich der industriellen Automatisierung beschleunigen werden.

Mit der Bereitstellung kostengünstiger leistungsfähiger Rechner mit 16- oder 32-bit-Verarbeitungsbreite und hoher Arbeitsgeschwindigkeit für arithmetische Operationen und Signalprozessoren vergleichbarer Leistungsfähigkeit wird in Verbindung mit der Befriedigung wachsender Gebrauchswertanforderungen ein Prozeß eingeleitet, der mit Ablösung analoger Signalverarbeitung endet.

Literatur

[1] *Brandt, W.:* Das Prozeßleitsystem audatec im kontinuierlichen Feinstahl- und Drahtwalzwerk für die Sowjetunion. VEB Automatisierungsanlagenbau, Technische Informationen (1986) 11, S.1–4
[2] *Schönfeld, R.; Büchner, P.; Güldner, H.; Habiger, E.; Pundt, H.:* CAD-Systeme mit CAD-Verfahren der Automatierungs- und Elektroenergietechnik. ELEKTRIE 41 (1987) 9, S.332–336
[3] *Kronberg, M.; Richter, H.:* Anforderungen an Programmsysteme zum rechnergestützten Entwurf leistungselektronischer Schaltungen. Internat. Wiss. Konf. der TU Karl-Marx-Stadt vom 18. bis 21. November 1986
[4] *Schönfeld, R.; Habiger, E.:* Automatisierte Elektroantriebe. Berlin: VEB Verlag Technik, 1983
[5] *Kabisch, H.:* Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes umrichtergespeister Drehstromantriebe in der Industrie. ELEKTRIE 34 (1980) 2, S.59–65
[6] *Wagner, R.:* Neuer rückwirkungsarmer Netzstromrichter für stromgeführte Antriebssysteme elektrischer Bahnen. Vortrag 5.1.10. der Internationalen wissenschaftlichen Konferenz Karl-Marx-Stadt vom 18. bis 21. November 1986, Bl. 1–4
[7] *Bezold, K. H.; Mues, M.; Nestler, J.:* GTO-Thyristoren auf elektrischen Triebfahrzeugen. Elektrische Bahnen 84 (1986) 3, S.75–84
[8] *Conrad, H.:* Stand und Tendenzen der Entwicklung von leistungselektronischen Bauelementen. ELEKTRIE (in Vorbereitung)
[9] *Kabisch, H.; Malorny, E.:* Elektrische Antriebe und Prozeßsteuerungen für Wasserpumpen. VEB Kombinat Automatisierungsanlagenbau, Wissenschaftlich-technische Information 17 (1981) 1, S.19–23
[10] *Wolf, H.; Goldbach, W.; Wolff, A.; Specht, S.:* Blindleistungskompensation untersynchroner Stromrichterkaskaden. Elektropraktiker, Berlin 40 (1986) 7, S.243–248
[11] *Krause, J.:* Mikroelektronik in der Antriebstechnik – Stand und Tendenzen. ELEKTRIE 42 (1988) 3, S.91–94
[12] *Hempel, H. P.:* Leistungshalbleiter werden intelligent. etz 108 (1987) 4, S.
[13] *Kabisch, H.:* Gleich- und Wechselrichter für Drehstromanschluß mit potentialfreien Modulen. ELEKTRIE 39 (1985) 1, S.9–11

EA 5896

Kürzlich erschienen, im Fachbuchhandel erhältlich

Systemanalyse und mehrkriterielle Entscheidung

Von Dr. sc. techn. Jochen Ester, 216 Seiten, 157 Bilder, 15 Tafeln, Kunstleder, DDR 28,— M, Ausland 38,— DM. Bestellangaben: 553727 4/Ester, Entscheidung

Die Polyoptimierung wird in die umfassendere Problematik der rechnergestützten mehrkriteriellen Entscheidungshilfsmittel eingebettet. Erstmalig werden die Beziehungen zwischen Entscheidungsfindung und modernen Konzeptionen der Systemtheorie (z.B. Fuzzy-Systeme) geschlossen dargestellt. Dabei wird eine Brücke geschlagen zwischen den heuristischen, ingenieurmäßigen Verfahren und den streng mathematischen Verfahren.

Für den mathematisch weniger Geübten werden weitergehende Erläuterungen gegeben. Die Anwendungen dienen der Illustration der behandelten Methoden; sie zeigen, welche Effekte durch zweckmäßige Auswahl der Methoden erzielt werden können und auf wieviel verschiedenen Gebieten die mehrkriterielle Betrachtungsweise angewandt werden kann.

Die Anwendung dieser Methoden hat große ökonomische Bedeutung für die Volkswirtschaft.

VT **VEB VERLAG TECHNIK BERLIN**

Mikroelektronik in der Antriebstechnik – Stand und Tendenzen

J. Krause, Berlin

Anstöße zu grundsätzlichen Veränderungen in der Automatisierungstechnik kamen zum einen aus der Innovation der (digitalen) Mikroelektronik, zum anderen aber durch neue Forderungen an die Produktqualität, an die Effizienz von Fertigungseinrichtungen sowie hinsichtlich neuer kommerzieller Bedingungen (Kostendruck, unterschiedliche Lieferländer usw.). Zwei Felder dieses sich gegenwärtig vollziehenden, tiefgreifenden Wandels sind dabei auszumachen:

— die Automatisierung technischer Abläufe und
— die Automatisierung technischer Tätigkeiten.

Weil nun Antriebe bzw. Antriebssysteme (im komplexen Sinn des Begriffs „adjustable speed drive" des IEC — TC 22) Bestandteile solcher hierarchisch strukturierten Automatisierungsanlagen sind (Bild 1), übernehmen sie doch darin funktionsbestimmende Aufgaben in der prozeßnahen Ebene, werden ihre Akzeptabilität und Akzeptanz ebenfalls von den allgemeinen Tendenzen in diesem Bereich festgelegt. So ist eben auch hier eine gewisse Verlagerung des Schwerpunktes von der Beherrschung der eigentlichen technischen Funktion auf deren kostengünstige Erstellung zu beobachten, um den mit der Einführung der Mikroelektronik schritthaltenden Kostenanstieg bei den Ingenieur-Service-Leistungen aufzufangen. Natürlich kommen solche Impulse nur im Kontext mit den verbesserten Möglichkeiten von Leistungs- [1] [2] [3] und Sensorelektronik [4] zum Tragen. Insbesondere letztere ermöglicht das Implementieren bisher nicht realisierter, neuer (Überwachungs-)Funktionen, wobei zwei gegenläufige Entwicklungen zu registrieren sind. Für technologische und Überwachungsfunktionen nimmt die direkte (In-situ-)Messung zu, im unmittelbaren funktionellen Umfeld des Antriebs wird eine Beschränkung der Meßtechnik bevorzugt. Wichtige Größen werden dann indirekt (z.B. unter Nutzung von Modellen) aus den wenigen verfügbaren Daten ermittelt.
Die Digitaltechnik hat — früher geäußerten Erwartungen entsprechend [5] — im Ergebnis dieses generellen Strukturwandels unmittelbare Stromrichternähe erreicht. Sie rüstet alle Leistungsklassen der Antriebstechnik aus, und ein Schwerpunkt liegt sogar in dem unteren, für OEM-Kunden besonders interessanten Bereich (hoher Produktionsstückzahlen), so daß hier die positiven Wirkungen der mit Mikrorpozessoren und Speichern realisierten digitalen Informationsverarbeitung besonders wirksam werden. Betroffen sind nicht nur Gleichstrom-, sondern vor allem Wechselstromantriebe, die infolge der Umrichterspeisung ein beträchtliches Energiepotential freisetzen [6] und demzufolge hohe Zuwachsraten am Markt erzielen.
Ausgehend vom aktuellen Anforderungsprofil und einer Situationsbeschreibung zum vorliegenden Stand werden im folgenden Entwicklungstendenzen dargestellt, die den sich gegenwärtig vollziehenden Generationswechsel, also den großflächigen Übergang von der Analog- zur Digitaltechnik unterstreichen.

1. Anforderungsprofil für Antriebssysteme

Das Anforderungsprofil in funktioneller Hinsicht wird von der Grundaufgabe, Bewegungsabläufe koordiniert durch Umformung elektrischer in mechanische Energie zu steuern, bestimmt. Auf Systemebene zwingt das zu geeigneter Struktur (ggf. mit funktioneller Redundanz), die auf Komponentenebene durch adäquate Maßnahmen bezüglich Auslegung, Erprobung, ihrer stetigen Qualifizierung überhaupt, flankiert wird. Die Systemerfolge sind dabei immer

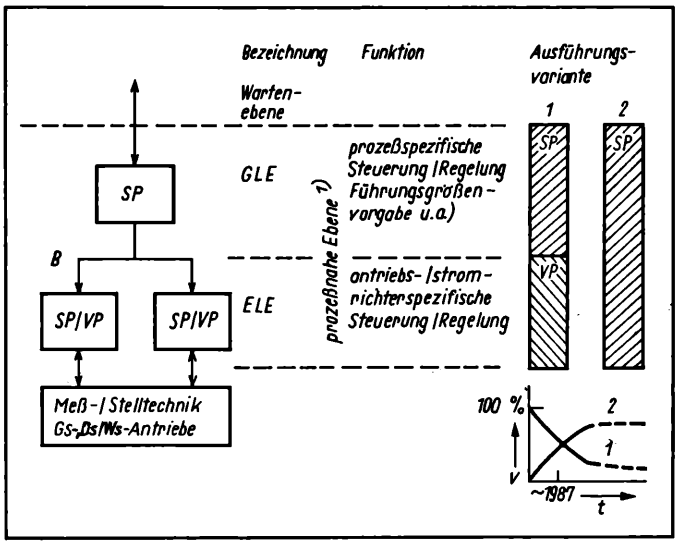


Bild 1. Trivialverarbeitungsstruktur eines Antriebssystems
GLE Gruppenleitebene
ELE Einzelleitebene
SP speicherprogrammierbar
VP verdrahtungsprogrammierbar (Analogtechnik)
B Verbindungsbus (Seriell-Stern, Ring, Linie, parallel)
V Produktionsvolumen

[1]) gerätetechnisch integrierbar

weniger ausschließlich auf die reine funktionelle Leistungsfähigkeit, sondern vermehrt auf andere Faktoren zurückzuführen (Tafel 1). Hervorgehoben zu werden verdient besonders das ungestörte Nebeneinander der räumlich zunehmend konzentrierten Komponenten unterschiedlichen Energieniveaus. Durch geeignete Maßnahmen ist die gegenseitige Beeinflussung z.T. prinzipiell unverträglicher Funktionen (z.B. Kommunikation und Elektronik) auf das zugelassene, störfeste Maß zu senken und ein Leistungsverhältnis von $1:10^{21}$ störschutztechnisch zu beherrschen. Einen hohen Stellenwert hat außerdem die „offene" innovationsfähige Gestaltung des Systems, was letztlich bedeutet, daß die Systemschnittstellen auf allen Ebenen (Bauelemente, interner Parallel-BUS, Systemsoftware, Netzwerk — serielle Kopplung) gültigen und akzeptierten Standards entsprechen.
Der gleiche Rang gebührt der Projektierungsfreundlichkeit mit geeigneten, in der klassischen Steuerungstechnik bereits verbreiteten CAD-Verfahren [7]. Auf der Basis einer kompatiblen Entwurfs- (Hardware, Software), Test- und Dokumentierumgebung (auf Multifunktionalität orientierte Gerätefamilie) ist ein für unterschiedliche Aufgaben und Ausführungsformen einheitlicher, trotzdem aber anwendungsspezifischer Bedienerzugang unter Nutzung standardisierter Beschreibungsmittel (SFP Signalflußplan, Funktionsplan, SFC Sequential Function Chart) und somit eine modulare, strukturierte Programmorganisation zu gewährleisten.
Obwohl der Schwerpunkt hier auf der Informationselektronik liegt, bleibt anzumerken, daß die enge Bindung des Motors an den Stromrichter und an das speisende Netz auch zu Spezifikationsänderungen in diesem Bereich führt [8], etwa Streureaktanz, Geräuschpegel und Erwärmung als frequenzabhängige Größen sowie die Integration von rechnerkompatiblen Meßgliedern (vorzugsweise für die Drehzahl und für Überwachungsaufgaben) u.ä. betreffend. Insgesamt müssen also ebenfalls die Leistungskomponenten des „Antriebssystems" ertüchtigt werden, um mit ihnen die von der Informationselektronik gebotenen Möglichkeiten voll ausnutzen zu können (z.B. hinsichtlich der Beeinflussung der Elektroenergiequalität EEQ gemäß TGL 43624, der Reduktion von Verlusten sowie der Senkung des Materialaufwandes durch Steuerverfahren hoher Taktfrequenz).
Die Erfüllung der speziellen Antriebsaufgaben einerseits bildet den alles überspannenden Rahmen, was sicher ein tiefer als bisher greifendes Verständnis des Kundenwunsches sowie statische Genauigkeiten bzw. Auflösungsvermögen im $^0/_{00}$-Bereich ($\leqq 1:2^{12}$) und hohe Dynamikeigenschaften (Abtastzeiten $T \leqq 1$ bis 10 ms, Anregelzeiten $\leqq 50$ ms bzw. $\leqq 2$ bis $5\,T$) erfordert. Andererseits ist aber auch eine ausgeprägte fertigungs- und servicefreundliche, qualitätsgesicherte Gestaltung des Produkts „Antriebssystem" zwingend.

Dr. sc. techn. *Joachim Krause*, VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin (Stammbetrieb des VEB Kombinat Automatisierungsanlagenbau) — Zentrum für Forschung und Technologie

Vortrag zur V. Fachtagung „Leistungselektronik" Leipzig, Mai 1988

Besonderheiten eines Antriebssystems (als „intelligente" prozeßnahe Peripherie einer Automatisierungsanlage)	funktionelle Anforderungen
• extreme Umgebungs-/Einsatzbedingung (z.B. − 55 °C, mech.-dyn. Beanspruchung) • hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten (Takt-/Zykluszeiten < 1 bis 10 ms) • höchste Störfestigkeitsforderungen durch extreme Nähe zu leistungsstarken Störern (Stromrichter, Netzrückwirkungen) • Platzbeschränkung • Spezialperipherie (für besondere Meßwerte und Ansteuerung) • hohe Anforderung an Zuverlässigkeit/Verfügbarkeit (bei beschränkter Hardware-Redundanz) • autarke Betriebs- und Inbetriebsetzungsfähigkeit (mit Universalgeräten) • höchste Schutzanforderungen (Reaktionszeiten ≦ 80 µs, Ventilschutz) • niedrigerer Projektierungsaufwand (hoher Firmware-Anteil, Hard-/Software-Typisierung)	• hohe Wiederholgenauigkeit durch digitale Sollwertführung/-vorgabe • Kopplungs-/Hierarchiefähigkeit (Kompatibilität zu unterschiedlichen AA, ggf. einheitliche Schnittstellen für Programmierung und DÜ) • reduzierter IB-Aufwand durch On-line-Funktionseinstellung mit Standardgeräten (ggf. bildschirmgeschützt) und Software-Parametrierung (bei automat. Dokumentation der Werte) • integrierte, aber unabhängige Überwachungsfunktionen (mit Fehlerspeicher und Klartext-Fehlerbild) • hoher Firmware-Anteil • harmonisierte und modulare HW und SW für Gleichstrom- und Wechselstrom-Antriebe (typisierungsfähig, erweiterbar) • Integration antriebs- und prozeßspezifischer Funktionen • CAD-Projektierungsverfahren (einheitliche Dokumentation für unterschiedliche Nutzergruppen) • Sicherung der EEQ (cos φ, Störstromemission), Senkung der Verluste u.a. durch hochtaktende Steuerverfahren (bei Anpassung an Netze unterschiedlicher Phasenzahl und Frequenz) • Realisierung moderner Steuerverfahren (Zustandsregelung, fehlertolerante, adaptive Verfahren auch mit Beobachter, begrenzungsfreie Sollwertführung u.a.)

Zunahme von IE-Verarbeitungsgeschwindigkeit und Schaltfrequenz der Leistungsbauelemente ↓

Tafel 1. Anforderungsprofil für die Informationselektronik von Antriebssystemen
AA Automatisierungsanlage, DÜ Datenübertragung, HW Hardware, IB Inbetriebsetzung, SW Software,

Zunahme Verarbeitungsleistung, Handhabbarkeit, Flexibilität ↓

	Hauptmerkmal	Funktion	Software	Hardware	EAB-Erzeugnisse
1983/1984	1-Prozessor-Rechner	technologiespezifische Steuerung/Regelung GAT	ohne BS, UP-Technik, Assembler, 8 bit	modular, flexibel, Registerkopplung	NAG/audatec [10]
1984/1985	2-Prozessor-Rechner (fester Master)	antriebsspezifische Steuerung/Regelung DAT (GAT), USV	ohne/mit BS, UP-Technik Assembler, 8 bit	modular, flexibel, Registerkopplung	DDU/GB2000 [11]
1987/1988	Mehr-Prozessor-Rechner (fester Master)	antriebsspezifische Steuerung/Regelung	mit BS, Funktionsmodule, (Assembler), 16 bit	modular, flexibel, Speicherkopplung	TRANSRESCH 700
	1-Prozessor-Rechner	antriebsspezifische Steuerung/Reglung	mit BS, Funktionsmodule, Assembler, 16 bit	modular, spezialisiert, Signalkopplung	Thyresch 700

Tafel 2. Entwicklung der digitalen Informationselektronik für Stromrichter (DAT/GAT)
BS Betriebssystem, DAT Drehstromantriebstechnik, GAT Gleichstromantriebstechnik, USV unterbrechungsfreie Stromversorgung; UP Unterprogramm

2. Erreichter Stand

Selbst eine nur oberflächliche Analyse der industriellen Verbreitung der verschiedenen Antriebstechniken bestätigt die immer noch währende Dominanz der mikroelektronischen analogen Gleichstromantriebstechnik. Stetig zunehmend dringt aber der „digitale Antrieb" mit Gleichstrom- und Drehstrommotoren auf der Basis der Mikroprozessortechnik vor. Während in der Gleichstromtechnik vorwiegend der Drehzahlregelung überlagerte Funktionen digital ausgeführt werden, erfolgt beim Drehstromantrieb sofort der Schritt bis in unmittelbare Antriebs- bzw. Stromrichternähe, weil eben nur die Rechnerverarbeitung eine wirtschaftliche Realisierung dieses Konzepts ermöglicht. Vereinheitlichte Geräte- und Programmkonzepte sind noch nicht ausgeprägt zu registrieren. Dynamisch besonders hochwertige Aufgaben laufen ohne Betriebssystem, Ansätze zu einer modularen Programmstruktur (ausnahmslos auf Assemblerniveau) sind unübersehbar.
Ausgehend von der aggregierten Situationsbeschreibung (Tafel 2) (Zeile 1, 2) im VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin läßt sich feststellen, daß

— die Einsatz- und Leistungsfähigkeit der digitalen Mikroelektronik auch in der Antriebstechnik mit Erfolg nachgewiesen wurde (z.B. [12] [13])

— der unter Nutzung der positiven Erfahrungen aus der Analogtechnik beschrittene Weg zur übersichtlich strukturierten Geräte- und Programmtechnik konsequent fortzusetzen ist und

— die mit der 8-bit-Generation (U880, U882) erreichten Leistungsgrenzen die Einführung von Regelungssystemen mit höherer Verarbeitungsbreite und -geschwindigkeit notwendig machen.

Bei den theoretischen Grundlagen ist der erreichte Stand zum einen von einer einheitlichen physikalischen Interpretation der Wirkungsmechanismen von Gleich- und Wechselstrommaschine nun auch im dynamischen Betrieb gekennzeichnet (vgl. Tafel 3), bei beiden Typen werden die moment- und flußbildenden Ströme bzw. Stromkomponenten zur Realisierung der Grundaufgabe „Momentensteuerung" unabhängig voneinander beeinflußt. Zum anderen kennzeichnet die Situation ein bereitstehendes praktikables Instrumentarium für Analyse und Synthese der progressiven digitalen Steuer- und Regelungsverfahren gemäß Tafel 1 [9]. Auf der Seite der Umsetzungsmöglichkeiten bieten sich mit den leistungsfähigen 16-bit-Bauelemente-Familien (z.B. U8001/U8002) der theoretischen Durchdringung adäquate Chancen, systematisierte, dem Grunde nach für alle Antriebsarten gleichermaßen gültige Realisierungsstrukturen zu schaffen.

3. Entwicklungstendenzen

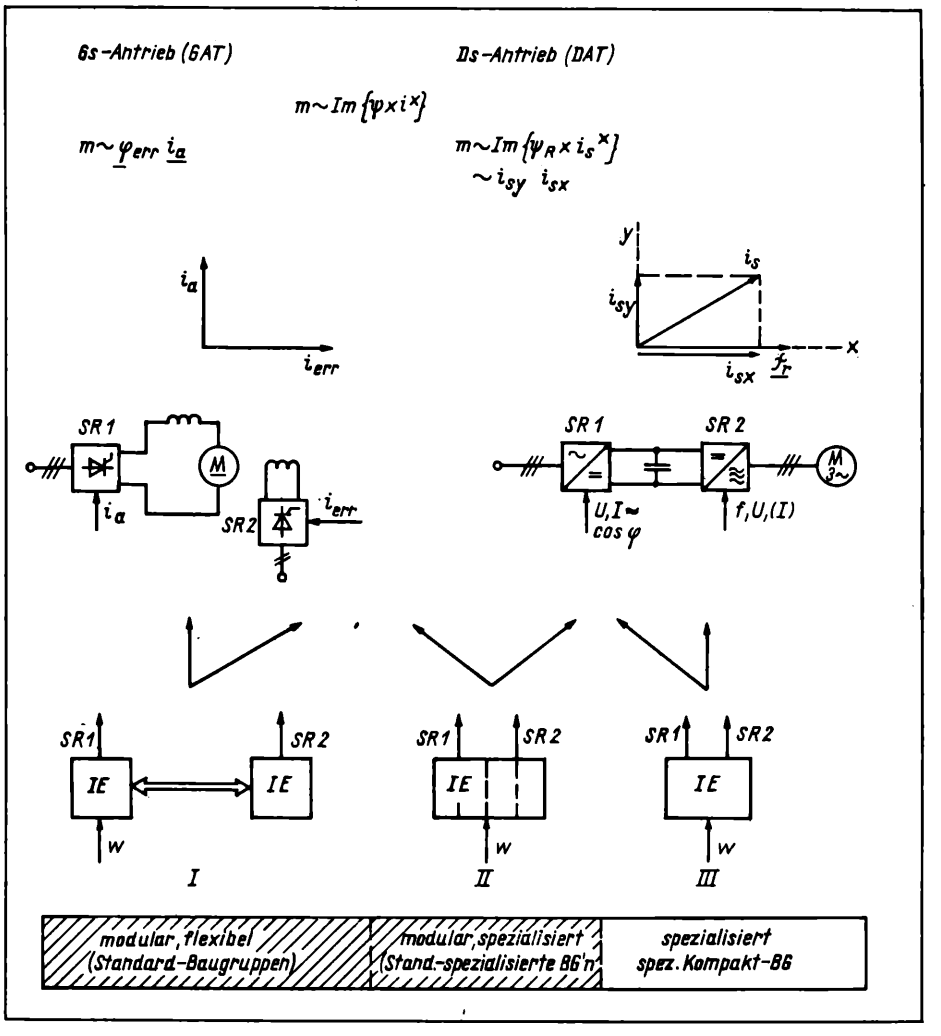
In einigen industriellen Bereichen, vollständig aber in der Neuentwicklung, ist der Abschied von der „gegenständlich greifbaren" analogen Technik vollzogen. Der weitere Weg muß nun die aufgeworfenen Fragen bzw. Probleme im Hinblick auf Handhabung, Sicherheit u.a. schrittweise beantworten und lösen.
Ausgehend vom aktuellen Bauelementeangebot eignen sich die drei bekannten Systemkonzepte mit ihren spezifischen Eigenschaften für die Neuentwicklung (Tafel 3):

— Konzept I
flexible Standard-Leiterkarten-Familie (1 Konfiguration je Stromrichter)

— Konzept III
maßgeschneiderte (1-Karten) Kompakt-Baugruppe (für je 1 Stromrichter).

Ein Kompromiß zwischen diesen beiden ist die Lösung II (1 Konfiguration aus wenigen Baugruppen für 2 Stromrichter), von der hinsichtlich einiger Grundanforderungen Flexibilität verlangt wird, die

Tafel 3. Informationselektronik (IE)-Systemkonzept
BG Baugruppe, SR Stromrichter, w Führungsgröße



bezüglich anderer Merkmale aber Speziallösungen bieten soll. Die bei allen drei Varianten beabsichtigte universelle Applikation für Gleichstrom- und Wechselstromantriebe wird beim Konzept III aus Kostengründen nicht erreichbar sein.

Zum Unterschied zu Konzept I werden die Varianten II und III in der Regel nur mit einem Prozessor (maximal mit 2 Prozessoren) ausgerüstet. Die Grundstruktur der modularen, höchsten Ansprüchen genügenden Variante I (Bild 2) nutzt durch den Einsatz mehrerer Prozessoren die verteilte Rechenleistung. Aufbauend auf einem Mehrprozessor-System (mit festem Master) entsteht der typische, auch in Automatisierungsanlagen einsetzbare Multiprozessor-Rechner. Seine Prozeßperipherie ist „intelligent" ausgeführt und über Speicher an die Zentraleinheit(en) gekoppelt. Zur Signalanpassung/-aufbereitung notwendige Baugruppen (eingeschlossen die ventilnahe Ansteuerelektronik) werden im Bedarfsfall räumlich abgesetzt, ebenso ist eine Integration mit der eigentlichen Peripheriekarte möglich. Die 1. Stelle der Baugruppen-Zähl-Nr. im Bild 2 macht die Erweiterungs-/Innovationsfähigkeit in bezug auf leistungsfähigere CPU-Typen bei unverändertem Grundkonzept aufmerksam. Wichtige Daten — im Vergleich zur aktuellen Situation — zeigt ebenfalls Tafel 2.

Mit einer solchen umfassend geplanten Produktlinie wird (z.B. durch die gemeinsame Nutzung typisierter Grundschaltungen in allen Konzepten) sichergestellt, daß entweder das Anforderungsprofil nach Tafel 1 vollständig (Konzept I) oder jeweils eine Untermenge (Konzepte II, III) realisiert wird. Generelle Gemeinsamkeiten sollten auf den Gebieten System-Software, Programmierumgebung sowie Verkopplungsfähigkeit bestehen. Die Programmierumgebung zeichnet sich durch wachsende Leistungsfähigkeit neben bestehender Aufwärtskompatibilität der Gerätetechnik aus (Bild 3) und ermöglicht somit eine weitgehend einheitliche Abwicklung der Anwendungsaufgaben in der Projektierung. Der letztlich angestrebte Verbundbetrieb dieser „Werkzeuge" (über ein lokales Netz) ermöglicht den direkten Zugriff auf das „Software-Lager". Die problemfreie Integration jedes Antriebs in (beliebige) verteilte

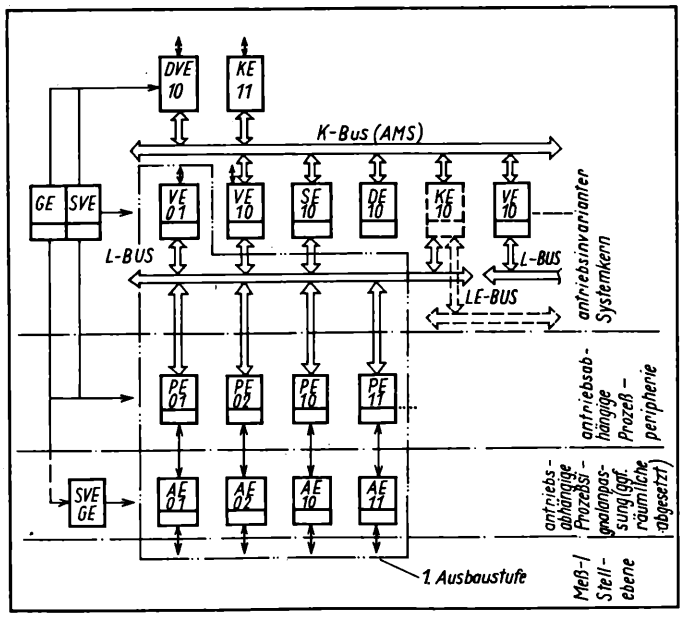


Bild 2. Modulares Multi-Prozessorsystem (Standard-Baugruppen)

AE	Anpaßeinheit	*K*-Bus	Kommunikations-BUS
DE	Diagnoseeinheit	*L*-Bus	Lokal-BUS
DVE	Datenperipherie-KE	*LE*-Bus	erweiterter BUS
GE	Gefäßeinheit	⟨=⟩	parallel
KE	Koppel- und Kommunikationseinheit	↔	seriell
PE	Prozeß-E/A-Einheit		
SE	Speichereinheit		
SVE	Stromversorgungseinheit		
VE	Verarbeitungseinheit		

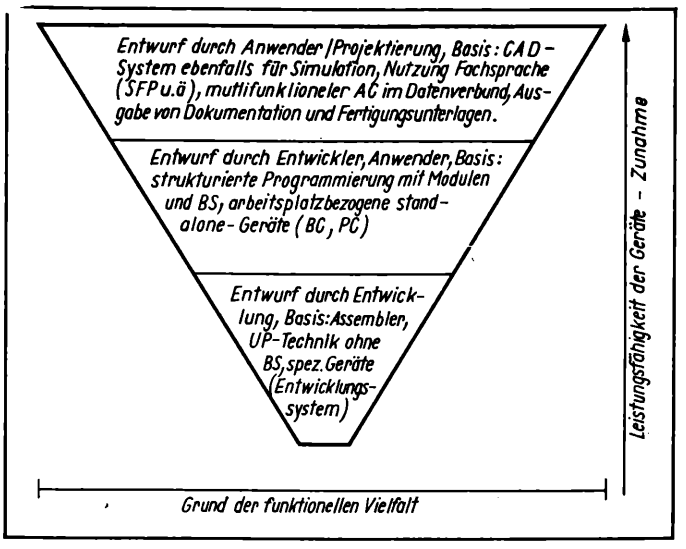


Bild 3. Entwicklungsphasen „Programmierumgebung" für die Anwendersoftware (AS)

AC Arbeitsplatzrechner
BS Betriebssystem
SFP Signalflußplan
UP Unterprogramm

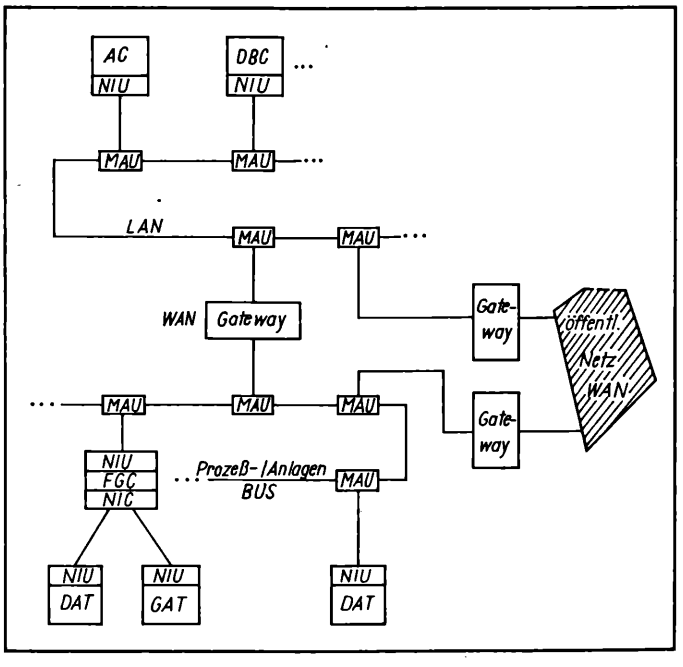


Bild 4. Integration eines Antriebs (in ein offenes Rechner-/Automatisierungssystem)

LAN Local Area Network (in-house)
WAN Wide Area Network
AC Arbeitsplatzrechner
DBC Datenbankrechner
FGC Führungsgrößenrechner
NIU Network Interface Unit
MAU Medium Attachment Unit (Kabelanschlußeinheit)

Systeme (distributed systems) garantiert die Orientierung an standardisierten Schnittstellen im Rahmen des ISO-Referenzmodells für offene Kommunikation (OSI Open Systems Interconnection) (Bild 4) [14], wobei Ausgangspunkte die im Einsatz befindlichen BUSSE IFSS und IFLS bilden [10].

Hinsichtlich der Software steht, wie bereits im Zusammenhang mit Bild 3 erwähnt, der durchgehend rechnergestützte Entwurf — beginnend mit der Simulation, endend bei Dokumentation, Fertigungsunterlagen und Inbetriebsetzung — im Vordergrund. Auf der Basis eines zugeschnittenen, im wesentlichen eine Zeitverwaltung der Software-Funktionsbausteine/-Module organisierenden und die extremen Zeitforderungen erfüllenden Echtzeitbetriebssystems (Dispatcher) [15] erfolgt die notwendige „Rückkehr" zur Notation der Regelungs- und Steuerungsaufgaben mit Signalfluß- bzw. Funktionsplan o.ä. Nur damit wird eine der Gerätefertigung angepaßte fehlerarme Software-Produktion in Form eines „Fügeprozesses" mit komfortablen Software-Werkzeugen möglich.

4. Ausblick

Auch künftig wird die mit schnellem Tempo vor sich gehende Entwicklung der Elektronik dem Antriebstechniker neue Aufgaben stellen. Lichtwellenleitertechnik und verbesserte Leistungsbauelemente (GTO, Transistoren) wirken sich auf die Interface-Hardware und besonders auf die ventilnahe Ansteuerelektronik aus. Im zuletzt genannten Bereich wird die Übertragung von Informationen und Energie konsequent zu trennen sein (möglichst bei Entnahme der Zündenergie aus dem Leistungskreis). Leistungsfähigere Prozessor-/Schaltkreis-Familien (die Bewertungsfaktoren — BF = Gatteranzahl × Taktfrequenz/Chipfläche — streben Werten $> 10^{11}$ bis 10^{13} zu) ermöglichen infolge ihrer vergrößerten Verarbeitungswortbreite und ihrer veränderten Verarbeitungsstrukturen (z.B. DSP Digital Signal Processor mit Harvard-Struktur bzw. RISC-Architektur [16]) in Verbindung mit anwendungsspezifischen Schaltkreisen (ASIC) die Verwirklichung noch schnellerer Vorgänge bei gesteigerter funktionaler Komplexität sowie vor allem eine drastische Kompensation des prinzipiellen Mangels der Unübersichtlichkeit der Digitaltechnik durch einen dann endgültig problemlosen Nutzerzugang bei Projektierung, Inbetriebsetzung, Service/Fehlersuche usw. Dieser Zustand schließt u.a. die Programmerstellung über einen einheitlichen Zwischencode ein, der von unterschiedlichen formalisierten Notationsweisen der Aufgabenstellung erreicht und für verschiedene Zielprozessoren übersetzt werden kann.

Literatur

[1] *De Bruyne, P.:* Intelligente und kraftvolle Leistungshalbleiter. elektro-anzeiger 39 (1986) 11, S. 17–24
[2] *Conrad, H.:* Stand und Tendenzen der Entwicklung von leistungselektronischen Bauelementen. ELEKTRIE (in Vorbereitung)
[3] *Kabisch, H.:* Technischer Stand und Entwicklungstendenzen der Stromrichter in der DDR und den RGW-Staaten. ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 3, S. 85–90
[4] *Günzel, K.; Kaulfersch, H.:* Industrielle Sensortechnik im Aufwind., Siemens Energie & Automation 8 (1986) 2, S. 48–53
[5] *Krause, J.:* Mikrorechner zur Steuerung und Regelung elektrischer Antriebe. Vortrag zum 25. IWK TH Ilmenau 1980 [vgl. auch ELEKTRIE, Berlin 36 (1982) 1, S. 20–21]
[6] *Diehl, R.:* Rationelle Nutzung der Elektroenergie in der Antriebstechnik. Stahl + Eisen 103 (1983) 12, S. 593–598
[7] *Habiger, E.; Hammer, V.:* Ein CAD-System für speicherprogrammierbare industrielle Steuerungen. messen steuern regeln 30 (1987) 7, S. 295–301
[8] *Budig, P. K.:* Aspekte der Auslegung von Antriebsmotoren bei Stromrichterspeisung. ELEKTRIE, Berlin (in Vorbereitung)
[9] *Schönfeld, R.:* Digitale Regelung elektrischer Antriebe. Berlin: VEB Verlag Technik 1987
[10] *Krause, J.:* audatec — mikrorechnergestütztes Konzept zur Steuerung und Regelung in Automatisierungsanlagen. ELEKTRIE 37 (1983) 1, S. 5–9
[11] *Hofmann, U.; Neumann, L.:* Betriebsverhalten eines frequenzgesteuerten Drehstromantriebs mit durchgängig digitaler Informationsverarbeitung. Internat. Wiss. Konferenz Technische Universität Karl-Marx-Stadt, Nov. 1986
[12] *Surek, D.:* Ergebnisse beim Einsatz von Frequenzumrichtern für drehzahlvariable Pumpenaggregate. Information Pumpen und Verdichter (1985) 1, S. 37–39
[13] *Brandt, W.:* Das Prozeßleitsystem audatec im kontinuierlichen Feinstahl- und Drahtwalzwerk für die Sowjetunion. Technische Informationen Automatisierungsanlagen/Elektroenergieanlagen (1986) 11, S. 1–4
[14] *Bene, H.; Schneider, F.:* Prozeßdatenübertragung in lokalen Netzen. etz 107 (1986) 16, S. 736–741
[15] *Eckstein, A.:* Modulares Softwaresystem für digitale Regeleinrichtungen elektrischer Antriebe. Vortrag zur 11. Wiss. Konferenz, Technische Universität Dresden, Sektion Elektrotechnik, Nov. 1987
[16] Marktübersicht — Signalprozessor-IC's. Markt & Technik (1987) 5, S. 90–92

EA 5888

Technologische Kopplung von DDC-Gleichstromantrieben

G.-H. Geitner, A. Dittrich, A. Eckstein, KDT, Dresden; M. Pfeiffer, S. Eckardt, Berlin

Mit dem gegenwärtigen Stand der Soft- und Hardware [1] liegt eine nachnutzungsfähige Lösung zur direkten digitalen Regelung von Gleichstromantrieben mit Sechspulsgleichrichtern beim Einsatz des 8-bit-Prozessors U880/Z80 vor. Die Hardware setzt sich aus vom VEB EAB entwickelten modularen Baugruppen unter Nutzung des weitverbreiteten K1520-Busses zusammen. Die Leiterkarten sind zum Teil für den Einsatz in Gleichstrom- und Drehstromantrieben geeignet.

Der Einsatz eines Verwaltungsprogramms zum Aufruf der einzelnen Steuer- und Regelungsmodule, das Grundfunktionen eines Echtzeit-Betriebssystems realisiert, gewährleistet eine gute Übersichtlichkeit der Software. Damit und durch den Einsatz der in [2] vorgestellten und erweiterten UP-Bibliothek zur Realisierung arithmetischer Berechnungen werden die für elektrische Antriebe notwendigen kleinen Zyklus- bzw. Abtastzeiten im ms-Bereich ermöglicht. Die Notation von Steuerprogrammteilen für Schutz- und Verriegelungsfunktionen in PLZ/ASM ist auch für zeitkritische Anwendungen der Versuch eines ersten Schrittes weg von der Assemblerprogrammierung. Sämtliche Softwarearbeiten einschließlich der Programmierung der eingesetzten U 2716 erfolgen am Bürocomputer A5120 unter dem Betriebssystem UDOS.

Der erreichte Stand der Entwicklungsarbeiten wurde am Modell einer Arbeitsmaschine mit mehreren elektrischen Antrieben getestet. Stand und Ergebnisse sollen im folgenden demonstriert werden.

1. Hardware

Die Minimalkonfiguration für die Steuer- und Regelelektronik eines durchgängig digital geregelten kreisstromfreien Gleichstromumkehrantriebs mit 6-Puls-Brückengleichrichter besteht aus 6 Leiterkarten (4 davon K1520-Systembus) von doppeltem Europa-Format bei einfacher Breite sowie Netzteil (Bild 1). Bei einer Kompaktlösung mit der gedruckten Rückverdrahtung STS K0120 steht somit noch ein Steckplatz wahlfrei zur Verfügung.

Die universelle Adressierungslogik der impulsverlustfreien Drehzahlmessung und der interruptfähigen Binär-E/A ermöglicht den mehrfachen Einsatz dieser Karten in einem Modul, wenn technologisch bedingt eine erhöhte Anzahl von Prozeßsignalen in einem DDC-Antrieb verarbeitet werden soll. Für die Kommunikation mit der Bedientastatur sowie weiteren DDC-Antrieben hat die zentrale Recheneinheit 2 IFSS-Kanäle. Der Informationsaustausch mit dem unterlagerten U882 zur — Firmware darstellenden — Stromregelung und Stellgliedansteuerung erfolgt kodiert über ein spezifisches Parallelinterface.

Alle Baugruppen wurden zur Erleichterung von Inbetriebnahme und Fehlersuche frontseitig mit Leuchtdioden zur Anzeige wichtiger Signale bestückt. Die Bedienung des einzelnen DDC-Antriebs erfolgt über die Bedientastatur, die u.a. folgende Möglichkeiten bietet:

- — Kommandoeingabe (z.B. Ein- und Ausschaltkommando für Schützensteuerung)
- — Anzeige von 2 fest adressierten Istwerten und einem variabel adressierbaren Istwert
- — Anzeige von Betriebszuständen und Fehlermeldungen (Buchstabenkode)
- — Sollwert-, Begrenzungs- und Parameteränderungen
- — Auswahl eines von maximal 15 festen Testprogrammen
- — Speicher lesen und schreiben.

Dipl.-Ing. *Andreas Dittrich* ist Forschungsstudent, Dr.-Ing. *Andreas Eckstein* und Dr.-Ing. *Gert-Helge Geitner* sind wissenschaftliche Assistenten am Wissenschaftsbereich Elektrische Automatisierungstechnik an der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden; Dipl.-Ing. *Martin Pfeiffer* und Dipl.-Ing. *Siegfried Eckardt* sind Entwicklungsingenieure im ZFT des VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin.

[1]) Die dem Aufsatz zugrunde liegenden Forschungen wurden z.T. im Auftrag des VEB EAB bzw. des VEB Elektronik Gera durchgeführt.

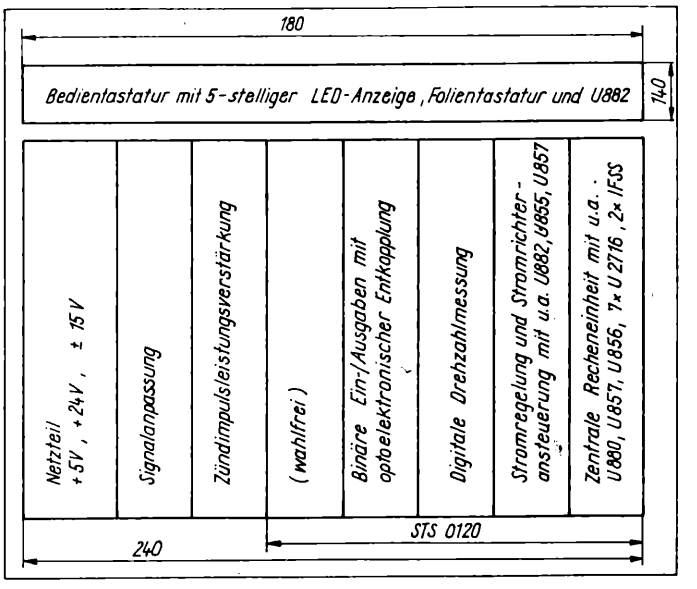


Bild 1. Elektronik-Minimalkonfiguration für einen DDC-Gleichstromantrieb nach [1

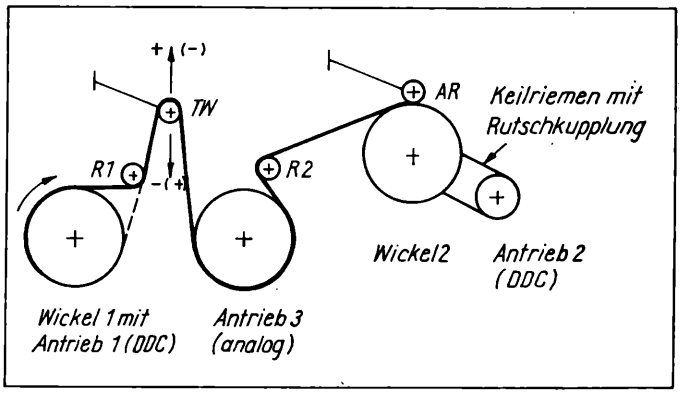


Bild 2. Mechanischer Aufbau eines Arbeitsmaschinenmodells mit Mehrmotorantrieb R1, R2 Rolle; TW Tänzerwalze; AR Andruckrolle

Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit von DDC-Antrieben der beschriebenen Struktur wurde das Modell einer Arbeitsmaschine mit Mehrmotorenantrieb aufgebaut (Bild 2). Ein digital geregelter Aufwickelantrieb 2, der den mit einer Andruckrolle zur Durchmessermessung versehenen Wickel 2 über einen Keilriementrieb mit Rutschkupplung antreibt, erhält das aufzuwickelnde Material (Papier, Textilien, Folie) von einem analog geregelten Hauptantrieb 3, dessen Walze gummibeschichtet ist, um eine hohe Haftreibung zu erzielen. Der digital geregelte Abwickelantrieb 1 führt das Material über eine Tänzerwalze als Schlingenspeicher dem Hauptantrieb 3 zu. Die Antriebe werden durch folgende Angaben charakterisiert:

Abwickler (1)

- — DDC Reversierantrieb nach [1] mit starrer Kopplung des Wickelzylinders
- — Impulsgeber IGR 2500 für Motor und Tänzerwalze
- — zwei Drehzahlmeßglieder für Motordrehzahl und Tänzerwalzenstellung, ein Meßglied für Drehzahl Antrieb 3
- — Motor 0,4 kW, 220 V mit konstantem Feld

Hauptantrieb (3)

- — analoge Strom- und Drehzahlregelung mit starrer Kopplung der Antriebswalze
- — 2pulsiger netzgelöschter Umkehrstromrichter TDR 100
- — Impulsgeber IGR 2500 für Motor
- — Motor 0,4 kW, 220 V mit konstantem Feld

Aufwickler (2)

- — DDC-Antrieb nach [1] mit Rutschkupplung zum Wickelzylinder
- — Impulsgeber IGR 2500 für Motor und Durchmesser
- — zwei Drehzahlmeßglieder sowie ein DA-Wandler zur Sollwertvorgabe für Antrieb 3
- — Motor 0,16 kW, 220 V mit konstantem Feld.

Bild 3 zeigt den Versuchsaufbau mit eingelegtem Material. Ist der Abgang von Wickel 1 „oben" und „unten" zulässig, so muß bei

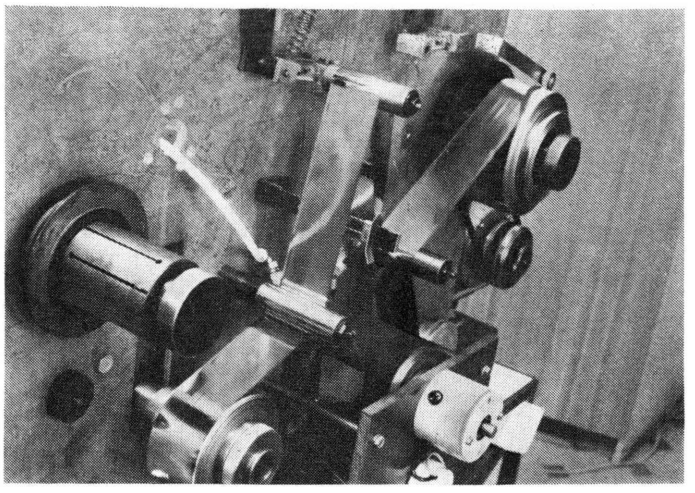


Bild 3. Realisierter Modellaufbau für eine Mehrmotorenstruktur nach Bild 2 mit eingelegtem Material

gleicher Drehrichtung die Vorzeichenzuordnung zur Bewegung der Tänzerwalze umgekehrt werden (vgl. Bild 2). Um die Einstellung eines Bandzuges zu simulieren, kann die Tänzerwalze durch einen Pneumatikzylinder ausgelenkt werden. Der Nachteil dieser einfachen Nachbildung besteht darin, daß das Meßsystem nicht quasi masselos ist, da ein Gegengewicht fehlt. Um ein Hängenbleiben des Hydraulikzylinders zu vermeiden, kann wahlweise eine Kombination mit einer Feder erfolgen (Bild 3).

2. Regelung der Digitalantriebe

2.1. Regelkonzeption

Bedingt durch einen großen Umschlingungsgrad der Walze von Antrieb 3 (im Zusammenhang mit einem hohen Reibkoeffizienten durch den Gummibelag dieser Walze), können die beiden DDC-Antriebe regelungstechnisch als quasi entkoppelt betrachtet werden. Aufgabe von Antrieb 2 ist es, das Material mit einer konstanten Arbeitsgeschwindigkeit aufzuwickeln. Hierzu genügt die zum DDC-Einzelantrieb gehörige Drehzahlregelung mit variabler Vorwärtskorrektur und unterlagerter Stromregelung.
Die Vorgabe des Drehzahlsollwertes erfolgt durch Berechnung aus dem mit der Andruckrolle ermittelten Durchmesser des Wickels 2 bei Addition eines einstellbaren Korrekturwertes zur Realisierung eines variablen Schlupfes zwischen den Antrieben 2 und 3. Auf diese Weise wird die Straffung des Materials erreicht.
Die Vorgabe der Solldrehzahl von Antrieb 3 erfolgt über DA-Wandler und Tastatur von Antrieb 2 aus.

Bild 4. Normierter Signalflußplan zur Regelung der Tänzerwalzenstellung und Geschwindigkeitsdifferenz (T_w = 15,2 ms)

Normierung:

Größe	Bezugsgröße	Bestimmung von T_0
n_3, n_1	1 U/min	
$\bar{n}_3, \bar{n}_1, \bar{S}_{ist}$	1 Inc.	$T_0 \approx \frac{\Delta\bar{l}/\text{Inc.} \cdot T}{\Delta\bar{n}/\text{Inc.}}$
S_{ist}	1/20 mm	(ohne Material)
$\bar{V}_1^*, \bar{V}_3^*, \Delta\bar{V}_{ist}^*$	πd_3	
V_1, V_3, V_{ist}	1 U/min · πd_3	

Antrieb 1 hat die Aufgabe, die Tänzerwalze unabhängig von Materialgeschwindigkeit, Wickeldurchmesser und dynamischen Vorgängen konstant in einer mittleren Position ($\bar{S}_{Soll} = 0$) zu halten. Die sich damit ergebende Regelstruktur zeigt Bild 4. Der vorhandene Drehzahlregler ist als Differenzgeschwindigkeitsregler $G_{R\,DV}$ einzusetzen und zusätzlich ein überlagerter Durchhangregler $G_{R\,Du}$ einzubauen. Da als Meßwerte nur die Tänzerwalzenistst ellung $\bar{S}_{ist}$ und die Drehzahlmittelwerte $\bar{n}_1$ und $\bar{n}_3$ zur Verfügung stehen, muß die mittlere Istgeschwindigkeitsdifferenz berechnet werden. Es bieten sich 2 Modelle an:

$$\Delta\bar{V}_{ist}^* = \frac{T_S}{T_w}\left[\bar{S}_{ist}(n) - \bar{S}_{ist}(n-1)\right]. \tag{1}$$

T_w Integrierzeit der Durchhangregelstrecke.

$$\Delta\bar{V}_{ist}^* = \bar{n}_1 \cdot \frac{d_1}{d_3} - \bar{n}_3. \tag{2}$$

Da die Berechnung des Durchmesserverhältnisses sowohl aus rechenzeitlichen als auch regelungstechnischen Gründen relativ selten im Verhältnis zur Abtastzeit des Grundregelkreises erfolgt, erhält das Modell nach (1) den Vorzug. Die Brauchbarkeit dieser Struktur wurde wegen zu befürchtender Störeinflüsse durch $\bar{S}_{ist}$ mit einem Simulationsprogramm [3] überprüft und bestätigt.

2.2. Optimierung

Der Einsatz digitaler PI-Regler, optimiert nach dem Betragsoptimum für digitale Regler (BOD), garantiert für den vorliegenden Mehrmotorenantrieb eine ausreichende Dynamik. Anhand von Antrieb 1 soll die Optimierung näher erläutert werden. Es gilt der Signalflußplan nach Bild 4.
Bezeichnet J_{MW} das Trägheitsmoment von Motor und Walze ohne Material, so gilt:

$$J_{ges} = J_{MW}\left(1 + \frac{J_{rel}}{J_{MW}}\right) \text{ bzw. } T_o = T_{oMW}\left(1 + \frac{J_{rel}}{J_{MW}}\right). \tag{3}$$

J_{rel} durchmesserabhängiger Anteil des Trägheitsmomentes,
T_0 Motorzeitkonstante.

Für $\frac{\varrho_{Material}}{\varrho_{Stahl}} \approx 0{,}125$ und $T_{oMW} = 100$ ms berechnet sich dann

$$T_o \approx 12{,}5\left[\left(\frac{r_{außen}}{r_{Walze}}\right)^4 + 7\right]. \tag{3a}$$

Wird der unterlagerte Stromregelkreis betragsoptimiert und im überlagerten Differenzgeschwindigkeitsregelkreis als Differenzengleichungsglied berücksichtigt, kann die Verstärkung eines ΔV-PI-Reglers

$$G_{R\,\Delta V} = \frac{V_R(1 + D_1 z^{-1})}{(1 - z^{-1})} \tag{4}$$

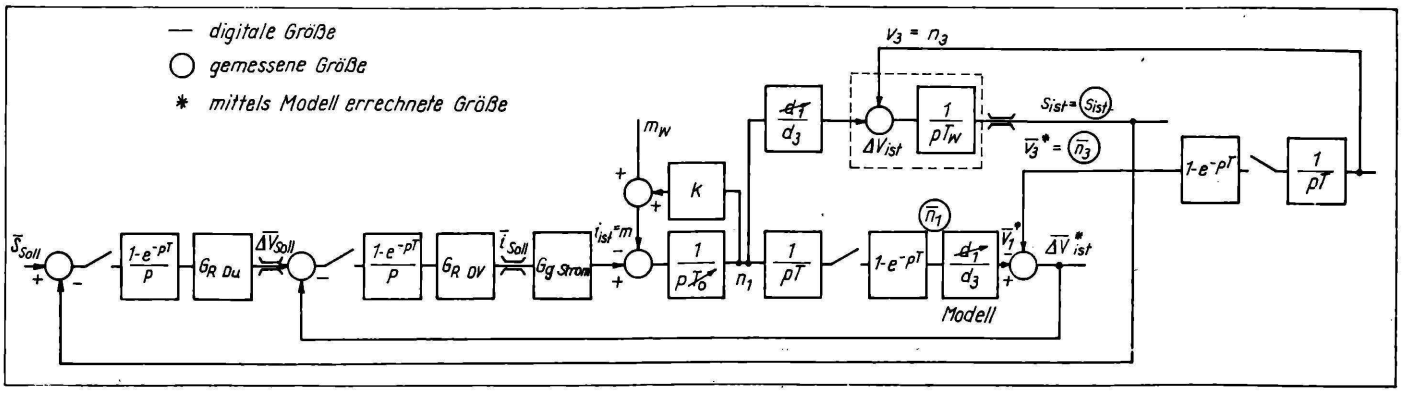
nach [4] in guter Näherung zu

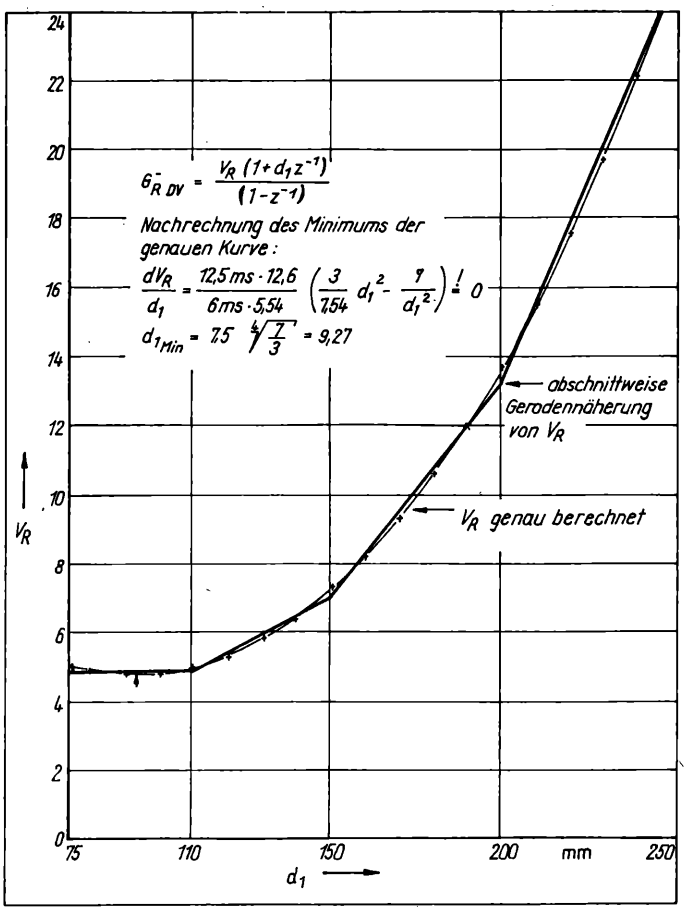
$$V_R = \frac{T_o}{T \cdot \lambda}\,\frac{1}{d_1/d_3} \tag{4a}$$

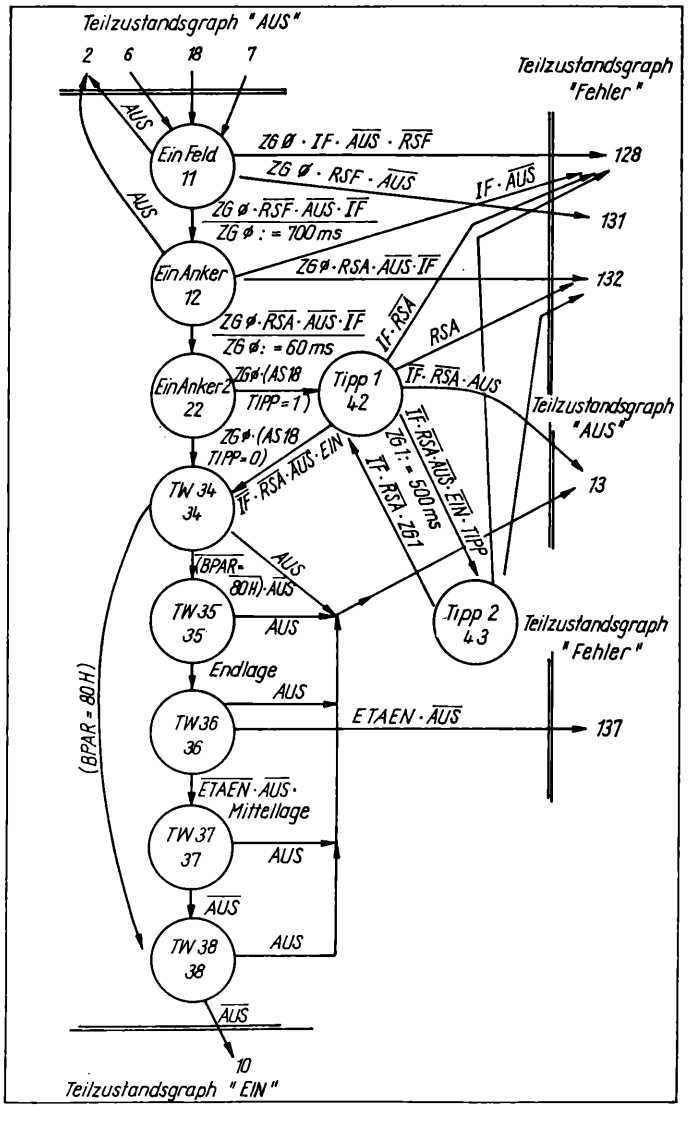
mit

$V_R \neq f(k)$ und $\lambda = 5{,}5$, vgl. Bild 4, bestimmt werden. Wegen der kleinen Abtastzeit $T = 6$ ms kann auch der Parameter D_1 als konstant angenommen werden:

$$D_1 = -\,e^{-\frac{T \cdot k}{T_o}} \approx \text{konst.} = -\frac{255}{256} = -\,0{,}9961. \tag{4b}$$







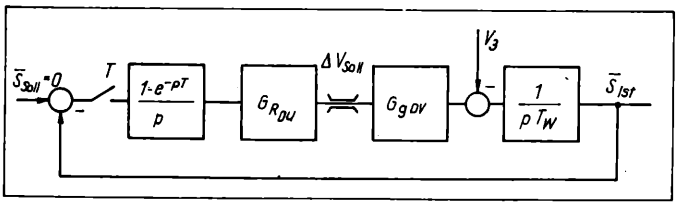


Bild 6. Signalflußplan für den überlagerten Durchhangregler (T = 6 ms, T_W = 15,2 ms)

◀ **Bild 5.** Verstärkung V_R des ΔV-Reglers (statt d_1 lies D_1)

Werte näher an „eins" gelegen sind auf Grund der Echtzeitanforderungen mit [2] nicht ohne Zusatzaufwand realisierbar.
Mit 75 mm $\leqq d_1 \leqq$ 250 mm resultiert ein Parameterbereich von

$$100\ \text{ms} \leqq T_0 \leqq 1631\ \text{ms} \quad \text{bzw.} \quad 5{,}1 \leqq V_R \leqq 25. \tag{4c}$$

Daß eine exakte Berechnung der Reglerverstärkung über (3a) und (4a) zur Adaption an den veränderlichen Durchmesser d_1 nicht notwendig ist, beweist Bild 5. Die Funktion $V_R\,(d_1)$ wird sehr gut abschnittsweise durch 4 Geraden genähert. Die Geradengleichung

$$V_R = a_x + b_x \cdot \frac{d_1}{d_3} \text{ mit } 1 \leqq x \leqq 4 \tag{5}$$

ist mit [2] leicht realisierbar. Da das Minimum nach Bild 5 nicht stark ausgeprägt ist, kann bei kleinen Durchmessern mit konstanter Verstärkung gearbeitet werden. Ausgehend von üblichen Materialtransportgeschwindigkeiten $V \leqq 250\,\frac{\text{m}}{\text{min}}$ und Materialdicken $h \geqq 10\ \mu$m kann die Adaption relativ selten (z.B. alle 128×6 ms) erfolgen. Dabei wird die nach d_1/d_3 umgestellte Gl. (2) verwendet.
Der Signalfluß für den überlagerten technologischen Durchhangregelkreis ist aus Bild 6 ersichtlich. Hierbei ist i.allg. eine Vergrößerung der Abtastzeit zulässig und die unterlagerten Regelkreise können dann als quasianalog betrachtet werden. Versuchsweise — im Hinblick auf eine hohe Dynamik — wird jedoch eine Synchronisation mit dem Differenzgeschwindigkeitsregler vorgegeben. Für die Verwirklichung der Funktion dieses Regelkreises genügt ein P-Regler ohne Anhebung der Verstärkung bei kleinen Regelabweichungen, da nicht die stationäre Genauigkeit, sondern die Stabilität dieses Regelkreises am wichtigsten ist. Tafel 1 enthält eine Zusammenstellung verschiedener Optimierungsergebnisse, die alle Zahlenwerte in der gleichen Größenordnung liefern.

3. Softwarekonzeption

Um trotz hoher Echtzeitanforderungen eine übersichtliche Software zu erreichen, wurde ein einfaches Echtzeit-Betriebssystem mit der Bezeichnung „Dispatcher" [5] zur Verwaltung der einzelnen Softwaremodule eingesetzt. Der Dispatcher arbeitet mit einem Grundtakt von 6 ms. Hierzu wird der Zeitgeber des Drehzahlmeßgliedes genutzt. Die Softwaremodule können mit unterschiedlichen Periodendauern synchron zueinander abgearbeitet werden. Es besteht die Möglichkeit der Synchronisation mit Ereignissen (Interrupts u.a.). Die Datenkommunikation zwischen den Modulen wird vom Dispatcher nicht unterstützt. In einem Grundtakt nicht fertig bearbeitete Module werden nach erneuter Abarbeitung höher priorisierter Module weiter berechnet. Damit besteht die Möglichkeit, mehrere langsame Hintergrundprogramme zu verwalten.

Tafel 1. Bestimmung der Verstärkung eines P-Durchhangreglers
(T_{SDV} = 20 bis 30 ms, λ = 5,5)

Optimierungsverfahren	Näherung für G_{gDV}	Verstärkung des P-Durchhangreglers Formel	Zahlenwert
BOD	$\frac{1}{1+pT_{SDV}}$	$\frac{T_W}{2 \cdot T_{SDV} + T}$	0,33 bis 0,23
Doppelverhältnis		$\frac{T_W}{2 \cdot T_{SDV}}$	0,38 bis 0,25
BOD	Differenzengleichungsglied nach [4]	$\frac{T_W}{2 \cdot T\lambda}$	0,23

◀ **Bild 7.** Teilzustandsgraph „Einschalten"

Parallel dazu besteht eine Ebene kurzer Interruptprogramme zur netzsynchronen Messung und Phasenregelung sowie zur schnellen Reaktion auf Fehler.
Die Softwareentwicklung erfolgte einheitlich an einem BC A5120 unter dem Betriebssystem UDOS, da hierunter die komfortablere Entwicklungssoftware verfügbar war. Dabei wurde die in [2] beschriebene und erweiterte UP-Bibliothek grundsätzlich vollständig geladen und für alle arithmetischen Berechnungen verwendet. Um mit den speziell laufzeitoptimierten Festkomma-Unterprogrammen die erforderliche Genauigkeit zu erreichen, muß der jeweilige Zahlenbereich der zu verarbeitenden Werte sorgfältig abgeschätzt werden. Drei Beispiele sollen das verdeutlichen:

a) Berechnung des Durchmesserverhältnisses nach (2):

$$\left(2^6 \frac{d_1}{d_3}\right) = \{(2^6 \cdot 2{,}5\overline{3})\,[\bar{S}_{\mathrm{ist}}(n) - \bar{S}_{\mathrm{ist}}(n-1)] + 2^6 n_1\}/\bar{n}_1, \qquad (6a)$$

b) Adaption der Verstärkung von G_{RDV} nach (5):

$$\overline{V}_{\mathrm{R}} = 2^8 a_x + 2^2 b_x \left(2^6 \frac{d_1}{d_3}\right), \qquad (6b)$$

c) Berechnung der Regelabweichung für G_{RDV} nach Bild 4:

$$x_{\mathrm{wDV}}(n) = \{(2^8 \cdot 0{,}25)\,[0 - \bar{S}_{\mathrm{ist}}(n)]\}\,2^{-8} - \{(2^6 \cdot 2{,}5\overline{3})\,[\bar{S}_{\mathrm{ist}}(n) - \bar{S}_{\mathrm{ist}}(n-1)]\}\,2^{-6}. \qquad (6c)$$

Betreffs des Wertebereichs und der Programmierung der Reglerparameter sei auf [6] verwiesen. Die praktischen Erfahrungen zeigen, daß die Pseudo-32-bit-Verarbeitung wesentliche Vorteile hat.
Der Einzel-DDC-Antrieb ist u.a. mit folgender Software ausgerüstet:

— Regler für Phase und Drehzahl (U 880) sowie Strom (U 882)
— Anlaufsoftware mit Hardwaretest, Slaverechnerprüfung, Zuschaltung mit Anlaufüberwachung des Phasenreglers, Netzphasenprüfung und Zuordnung und E/A Anfangsprogrammierung
— Kommunikationsprogramme zwischen dem Hauptrechner U 880 und den beiden Slaverechnern U 882
— Steuermodul mit Softlogik für Ein- und Ausschalten sowie Fehlererkennung einschließlich Reaktion und Anzeige
— Testprogramme für Inbetriebnahme und Fehlersuche
— Serviceprogramme zur Datenabspeicherung und normierten Anzeige auf Display (vgl. Abschn. 6.)
— Dispatcher mit wahlweiser Anzeige der Bearbeitungsebene durch zusätzlichen DA-Wandler
— Modul zur sinoidenförmigen Sollwertvorgabe.

Für das vorgestellte Anwendungsbeispiel waren im wesentlichen folgende Erweiterungen notwendig:

Antrieb 1
— Kommunikation mit Antrieb 3 über IFSS
— Durchmesserberechnung und Adaption nach Gl. (6a/b)
— Durchhangregler
— Steuermodulerweiterung für Anfahren der Nullage und automatischer Richtungsvorzeichenerkennung (vgl. Bild 2)
— Erweiterung der Fehlererkennung und -behandlung.

Antrieb 2
— Kommunikation mit Antrieb 1 über IFSS
— Durchmesserermittlung
— Sollwertvorgabe für Antrieb 3
— Berechnung von Korrekturaufschaltungen
— Erweiterung im Steuermodul und in der Fehlererkennung und -behandlung.

Der verfügbare Speicherbereich ist damit jeweils etwa 85% ausgelastet.

4. Kommunikation zwischen den Rechnern

Der Datenaustausch zwischen U 880 und U 882 für Stromregelung und Ansteuerung erfolgt über parallele I/O-Schnittstellen, um die erforderliche Übertragungsgeschwindigkeit zu erreichen.
Der Slaverechner erhält die Daten teils direkt, teils kodiert. Die Möglichkeit der kodierten Datenrückübertragung zum Hauptrechner wird für eine Bereitschaftsmeldung bzw. Fehleranzeige nach dem Einschalten sowie zur On-line-Daten- bzw. Registeranzeige genutzt.
Zur Verbindung zwischen intelligenter Tastatur (Bild 1) und Hauptrechner wurde eine IFSS-Schnittstelle gewählt. Die Tastatur ermöglicht folgende Funktionen:

— Kommandos: Ein, Aus; Stop/Run bzw. technologische Kommandos; Dec u. Inc (z.B. Sollwert)
— Fehlerquittierung
— Dezimale Vorgabe eines Sollwertes und von 15 Parametern; Tafel 2 enthält als Beispiel die Parameterbelegung von Antrieb 1
— Hexadezimale Anzeige und Änderung von Speicherzellen einschließlich einer indirekten Kommunikation mit dem Slaverechner
— Auswahl einer von 7 Testbetriebsarten (Softwareset, Zündimpulstest, Zündwinkelverschiebung, Stromsteuerung, Stromregelung...).

Tafel 2
Belegung der Tastaturparameter für Antrieb 1

Parameter	Funktion
1	G_{RDV} Verstärkung-Multiplikator
2	G_{RDV} Parameter d_1-Multiplikator
3	Lückgrenzstrom
4	G_{RDV} maximale Stellgröße
5	frei
6	frei
7	G_{RDU} Verstärkung-Multiplikator
8	Zeitkonstante Tänzerwalze
9	G_{RDV} Verstärkung-Exponent
A	Parameter T_{R}
B	Umschaltung der Betriebsart
C	Abtastperiode für Speichermodul ($n \cdot 6$ ms)
D	frei
E	Testbyte Anzeige
F	Schlüsselkodeeingabe

Des weiteren erfolgt über die zugehörige Anzeige die Ausschrift von im Anlaufprogramm oder on-line erkannten Fehlern, die entweder durch Betätigen der Quit-Taste einen Neustart erfordern oder nur als Warnungsanzeige erscheinen und überschrieben werden. Tafel 3 enthält Beispiele für beide Fehlergruppen.
Für den Informationsaustausch zwischen den DDC-Antrieben und der Leitebene ist eine zweite IFSS-Schnittstelle vorgesehen. Bezüglich der Modell-Mehrmotorenanordnung wurde die Bedientastatur von Antrieb 2 als Leitstand definiert und eine Übertragung von Steuerkommandos, Fehlern und Istwerten vorgesehen. Das gesamte Modell nach Bild 3 kann somit über eine Tastatur eingeschaltet und bedient werden.

5. Steuermodul

Der gesamte antriebsinterne Steuerungsablauf mit Einschalten der Betriebsspannung, über Selbsttest, Slaverechnerabfrage, Schützensteuerung, Stillstandsüberwachung und Fehlerauswertung wurde als Zustandsgraph notiert und entsprechend programmiert. Die einzelnen Zustände entsprechen damit der Berechnung zugeordneter Boolscher Gleichungen, deren positives Ergebnis die Weiterschaltbedingung zum nächsten Zustand darstellt. Der Steuermodul wird ebenfalls periodisch vom Dispatcher aufgerufen. Während die Einteilung in Module und der Aufruf durch den Dispatcher eine übersichtliche Gestaltung und Änderung des Gesamtprogramms ermöglicht, bewirkt innerhalb des Steuermoduls die direkte Programmierung als Graph eine anschauliche Darstellung und gute Voraussetzungen für Veränderungen in der Steuerlogik. Wie Bild 7 beweist, können folglich technologische Steueraufgaben geringeren Umfangs direkt einbezogen werden, ohne eine übergeordnete Leitebene zu definieren. Der Teilsteuergraph „Einschalten" (Bild 7) zeigt den Zustandsablauf beim Einschalten von Antrieb 1, ausgehend vom Teilsteuergraph „Aus". Erkennbar sind 3 Zeitüberwachungen für die Zuschaltung von Feld-(RSF) und Ankerschütz (RSA) sowie die Vorgabe einer Tippdrehzahl (TIPP2). Die Zustände TW 34 bis TW 38 enthalten das Anfahren einer Nullposition der Tänzerwalze bei Einsatz relativer inkrementaler Geber sowie die Ermittlung der richtigen Vorzeichenzuordnung zwischen Tänzerwalzenbewegung und Motordrehzahl. Der direkte Übergang von TW 34 zu TW 38 ermöglicht die Testbetriebsart „Drehzahlregelung von Antrieb 1". Erkennbar sind auch Bedingungen zum Übergang in Fehlerzustände, wie Verletzung der Zeitvorgaben, fehlende Rückmeldekontakte oder Feldstrom fließt nicht ($\overline{\mathrm{IF}}$).
Einen ersten Versuch in Richtung selbstdokumentierender Programme mit Elementen höherer Sprachen stellt die Notation der Graphenzustände in PLZ/ASM, unterstützt durch eine Makrobibliothek, dar.
Als Beispiel enthält Tafel 4 den Quelltext für den Zustand 10 „Betrieb". Nach Überprüfung des Feldstromes und der Ankerschütz-

Tafel 3. Beispiele für selbsttätig erkannte Fehler am DDC-Antrieb

Fehler mit Quittierung		Fehler als Warnungsanzeige	
Ub24	Ausfall 24 V	tAEn	Nullstellung der Tänzerwalze nicht innerhalb des Zeitlimit erreicht
Ub15	Ausfall 15 V	tE	thermische Überlastung des Motors
Ub12	Ausfall 12 V	IAIn	Überlauf des Ankerstromzählers
UA	überhöhte Ankerspannung	LdIn	Überlauf des Lückdauerzählers
IA	überhöhter Ankerstrom (Hardwarekomparator)	ADAP	Fehler bei Adaption (Division durch 0 gefordert)
IGR	Ausfall einer Spur des inkrementen Gebers	dUEA	Fehler bei Drehzahlübertragung (Antrieb 1)
PHAS	Aussteuerbereich des Phasenreglers reicht nicht	dUbE	Fehler bei Durchmessermessung (Ergebnis negativ)
nEt	Ausfall einer Netzphase	IPr	unzulässiger Interrupt
rSA	Rückmeldung Ankerschütz fehlt	150°	Wechselrichterzwangssteuerung durch Slaverechner ausgelöst
rSF	Rückmeldung Feldschütz fehlt		
PSP	Fehler im Programmspeicher		
dSP	Fehler im Datenspeicher		
ctc	Fehler im CTC		
n	Überdrehzahl		

Tafel 4. Beispiel für die Notation eines Steuerzustandes in PLZ/ASM

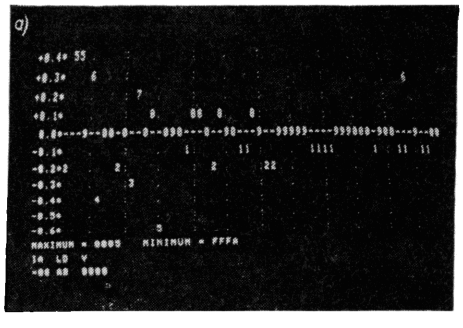
```
GLOBAL
  AS10_BETRIEB PROCEDURE
  ; normaler Betriebszustand
  ENTRY
    CALL AS127IF_RSA_ERKENN
    RET NZ
    CALL UP1_BETRIEB
    IF (AS10TASTATUR)
      CASE AUS THEN
            LOADB (AS10NUMMER),13    ; AUS1
      CASE STOP THEN
LOADB (AS10 NUMMER),25   ; STOPO
    FI
    LD HL, (AS10MITTELW_NIST)
    TESTHL
    IF Z THEN
          LOADB (AS10NUMMER),15  ; An-
                                   trieb
                                   steht
          STARTZEITGEBER 1, 180S
          RET
    FI
    CALL UP2_BETRIEB
  END AS10_BETRIEB
```

kontakte (AS127IF_RSA_ERKENN) erfolgt die Abfrage von Tastaturkommandos (AUS, STOP) und die Überprüfung des Drehzahlmittelwertes (AS10MITTELW_NIST). Über ein Zeitlimit kann mit letzterem die zulässige Stillstandszeit eines belasteten selbstbelüfteten Motors eingehalten werden. Die Zelle AS10NUMMER enthält die aktuelle Zustandsnummer für den nächsten Aufruf-zyklus. Die Unterprogramme UP1 und 2 bewirken die Auswertung weiterer Fehlerbedingungen. Fehlerzellen und -bits können durch Softwaremodule, zyklische E/A-Operationen und Interrupt gesetzt werden.

6. Meßergebnisse

Die Funktionstüchtigkeit des Modellantriebs wird im folgenden durch Diagramme belegt, die durch Nutzung interner Module für Meßwertspeicherung und normierte Displayausgabe gewonnen wurden.

Um trotz der begrenzten Zeilenzahl des Bildschirms eine befriedigende Auflösung zu erreichen, erfolgt die Kurvendarstellung durch die zweite Kommastelle des entsprechenden Wertes. Die Wertefolge im Bild 8a) ist beispielsweise zu lesen:
— 0,02; 0,455; 0,455... Die Bilder 8a) bis 8d) demonstrieren die Nachführung der Reglerverstärkung von Antrieb 1 entsprechend dem berechneten Durchmesser. Nachrechnung und Vergleich einzelner Punkte zeigen eine recht gute Übereinstimmung mit Bild 5. Die Auslenkung der Tänzerwalze ist ausreichend gering in bezug auf die Maximalauslenkung von $\pm$ 615 Inkrementen. Aus Sicherheitsgründen erfolgt beim Anfahren die Vorgabe eines Anfangsminimalwertes der Verstärkung. Beim Abbremsen des Modells wurde die Bremsbeschleunigung mit Tastatur in 4 Stufen vergrößert. Das quasistationäre Verhalten von Strom und Tänzerwalze bei kürzestmöglichem Meßintervall ist aus den Bildern 9a) und 9b) ersichtlich. Erste Erprobungen werden nur mit Materialgeschwindigkeiten bis



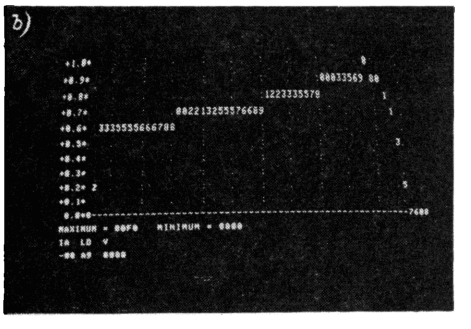


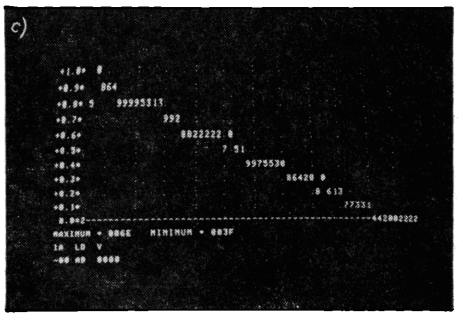
Bild 8. Meßergebnisse eines Abwickelvorgangs über etwa 20 min mit v = 100 m/min (Hochlauf, Abwickeln, Abbremsen, Tippbetrieb, Ausschalten)

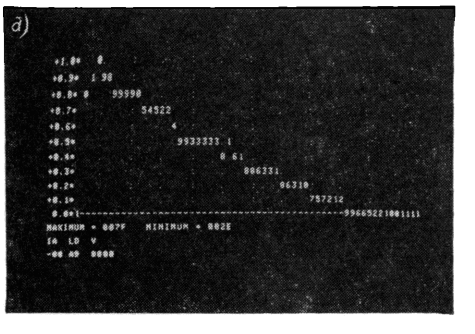
a) Auslenkung der Tänzerwalze $-6 \leq \bar{s}_{ist} \leq 5$

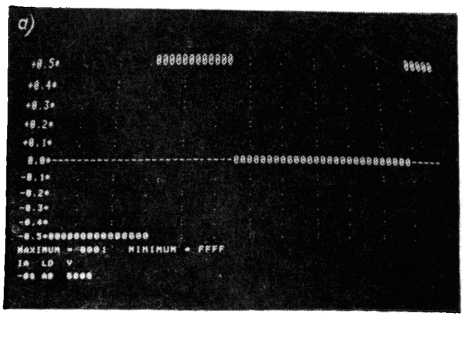
b) Drehzahl Antrieb 1 n_{Max} = 240 U/min (4malige Änderung der Abbremsbeschleunigung über Tastatur von Antrieb 2)

c) berechneter Durchmesser d_1 6E: 21,7 cm
3F: 12,4 cm

d) Reglerverstärkung V_R von G_{RDV} 7F: 15,9
2E: 5,8







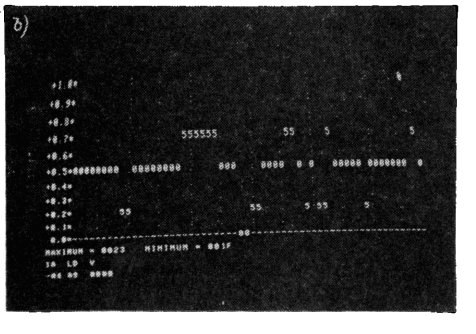
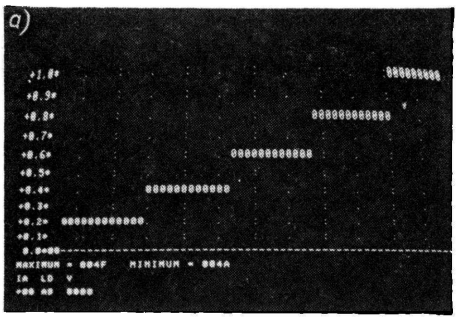


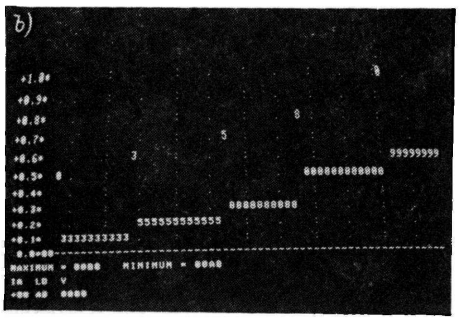
Bild 9. Quasistationäres Verhalten von Stromistwert und Tänzerwalze während eines Abwickelvorgangs
(v = 100 m/min, T_{Mess} = 6 ms)

a) Stellung der Tänzerwalze (Delta = 2 Inc.)

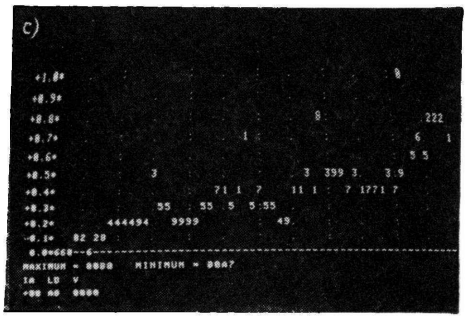
b) Stromistwert (Delta = 4 Inc.)



a) Bandgeschwindigkeit (74 m/min → 79 m/min)



b) Drehzahlsollwert Antrieb 2



c) Drehzahlistwert Antrieb 2

Bild 10. Verhalten der Sollwertvorgabe im Antrieb 2 während eines Hochfahrvorgangs (T_{Mess} = 24 ms)

etwa 210 m/min durchgeführt, da das Modell zunächst keine Kantensteuerung hat.

Im Antrieb 2 erfolgt die Berechnung der Solldrehzahl des Antriebs in Abhängigkeit von der vorgegebenen Bandgeschwindigkeit und des berechneten Wickeldurchmessers. Es ergeben sich dabei sinngemäß gleiche Verläufe, wie sie für Antrieb 1 in den Bildern 8b) und 8c) dargestellt sind.

Bild 10 verdeutlicht das Verhalten einiger Größen bei einem Hochfahrvorgang des Systems. Dem Bediener steht hierfür eine separate Taste zur Verfügung. Bei permanenter Betätigung der Taste wird vom Rechner der Bandgeschwindigkeits-Sollwert mit einer als Parameter einstellbaren Geschwindigkeit inkrementiert. Bild 10b) zeigt den daraus berechneten Drehzahlsollwert für den Antrieb 2. Die Wirkung der Vorwärtskorrektur ist deutlich sichtbar, ebenso im Verlauf des Drehzahlistwertes des Antriebs im Bild 10c). Da die Last, die hier den wesentlichen Beitrag zum vorhandenen Trägheitsmoment liefert, mit dem Antrieb über eine Kupplung gebunden ist, können die durch die Vorwärtskorrektur erzeugten Drehzahlüberhöhungen bei Verwendung einer Kupplung mit entsprechender Übertragungscharakteristik dazu genutzt werden, das erforderliche Beschleunigungsmoment besser auf den Wickel zu übertragen.

7. Zusammenfassung

Der vorgestellte Stand bei der direkten digitalen Regelung von Gleichstromantrieben ermöglicht es, den DDC-Antrieb nicht nur als Einzelantrieb einzusetzen, sondern sehr günstig auch in abgeschlossenen Mehrmotorenantrieben. Die mit der Aufgabenstellung des Modells nach Bild 2 erzielte Lösung ist relativ allgemeingültig und könnte mit entsprechender Modifizierung z.B. für Papier-, Druck- oder Schneidmaschinen Anwendung finden. Neben den durch die Kombination von Gleichstrommaschine und direkter digitaler Regelung gegebenen Vorteilen, wie hohe Drehzahlgenauigkeit, Reproduzierbarkeit und Beherrschung kleiner Drehzahlen, sind mit der Software eine Reihe weiterer Verbesserungen möglich: beliebiger Netzanschluß durch selbständige Drehsinnerkennung, Plausibilitätsprüfung der Istwerte, Selbsttest vor und während Betrieb der Antriebe, einfache Möglichkeiten der Parameteradaption, Modifikation des Steuermoduls entsprechend Anwenderwünschen. Die durchgängig am A 5120 entwickelte Software (Regler, Dispatcher, Steuerprogramm, UP-Bibliotheken...) liegt als UDOS-Quelldateien auf Diskette vor. Software und Hardware [1] haben sich bei ersten Erprobungen bewährt.

Drehzahlvariable Drehstromantriebe

P.-K. Budig, KDT, Karl-Marx-Stadt

Verwendete Formelzeichen

f	Frequenz
g	Gangzahl
I	Strom
J	Trägheitsmoment
k	Stromverdrängungsfaktor
m	Moment, normiert
M	Moment
n	Drehzahl
O	Oberfläche
P	Leistung
p	Polpaarzahl
R	Wirkwiderstand
s	Schlupf
t	Zeit
T	Periodenlänge
U	Spannung
Z_p	Polpaarzahl
X	Blindwiderstand
α	Ansteuerwinkel
α'	Wärmeübergangszahl
γ	Tastverhältnis
ε	Frequenzverhältnis
ε	Faktor der Ummagnetisierungsverluste
σ	Faktor der Wirbelstromverluste
ψ	magnetischer Fluß
ν	Ordnungszahl
ω	Kreisfrequenz

Indizes

1	Stator
2	Rotor
cu	Kupfer
do	Zwischenkreis (Leerlauf)
k	kipp...
n	nenn...
r	wirk...
σ	streu...
μ	magnetisierungs...

In hochentwickelten Ländern werden 50 bis 55% der elektrischen Energie in elektrischen Antrieben in mechanische Energie gewan-

Prof. Dr. sc. techn. *Peter-Klaus Budig* ist Leiter des Wissenschaftsbereiches Antriebstechnik/Antriebsmittel an der Technischen Universität Karl-Marx-Stadt.

Literatur

[1] *Köster, J.; Neumann, L.:* Der Einsatz von Mikrorechnern für die Steuerung und Regelung von Antrieben. VEM Technische Informationen (1986) 10, S.11–14

[2] *Geitner, G.-H.; Stoev, A.:* Programmierung bei Echtzeitanwendung. messen steuern regeln, Berlin 26 (1983) 2, S.73–82

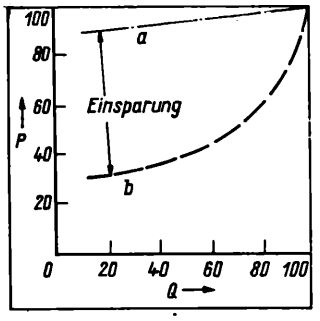
[3] *Müller, V.; Dittrich, A.:* Das Simulationssystem DS88. messen steuern regeln, Berlin 30 (1987) 5

[4] *Geitner, G.-H.; Krug, H.:* Zur Anwendung von BOD für DDC-Gleichstromantriebe. messen steuern regeln, Berlin 30 (1987)

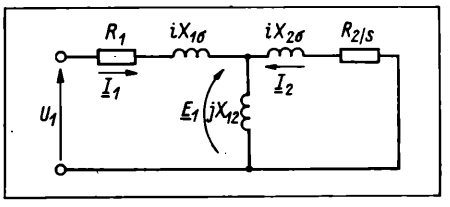
[5] *Eckstein, A.:* System zum modularen Softwareentwurf in zeitkritischen Anwendungen. Vortrag zum Problemseminar „System-Software für Mikrorechner" an der TU Dresden, April 1986

[6] *Geitner, G.-H.:* Verarbeitung gebrochener Zahlen bei Mikrorechnerechtzeitanwendung. radio fernsehen elektronik, Berlin 33 (1984) 5, S.295–297

EA 5796



1

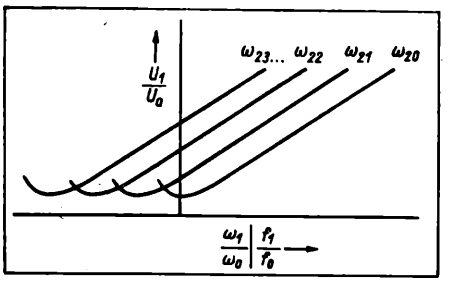


3

Bild 1. Mengenregelung einer Pumpe
a Bypaß oder Drossel
b Änderung der Motordrehzahl

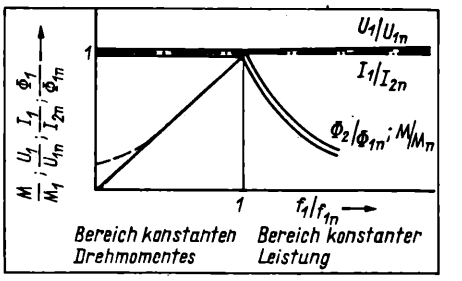
Bild 2. Methoden der Drehzahlstellung vom ASM

Bild 3. Ersatzschaltbild (einpolig) der Asynchronmaschine



4

Bild 4. Statorspannung U_1 des Asynchronmotors in Abhängigkeit von der Statorfrequenz ω_1 für verschiedenen Rotorschlupf (ω_s)
$\omega_{23} > \omega_{22} > \omega_{21} > \omega_{20}$



5

Bild 5. Betriebsdiagramm bei *f-U*-Schaltung

delt. Gut 80% aller Antriebsaufgaben werden durch Asynchronmotoren realisiert. Sie zeichnen sich durch ihren einfachen Aufbau und ihre robuste Konstruktion aus. Ihre Fertigung ist weitgehend automatisiert, durch Maßnahmen zur Minimierung der Materialaufwendungen bei gleichzeitiger Sicherung einer gleichbleibenden Qualität gekennzeichnet.

Der Wunsch, die Antriebsleistung — gekennzeichnet durch Drehmoment und Drehzahl — dem technologischen Prozeß anzupassen, erfordert den drehzahlvariablen Antrieb. Mit ihm erreicht man

— Einsparung von elektrischer Energie
— Verbesserung des technologischen Prozesses und damit Erhöhung der Qualität des Produkts und Verbesserung der Materialökonomie.

Bisher waren drehzahlvariable Antriebe überwiegend mit Gleichstrommaschinen realisiert worden. Diese Technik hat den Nachteil, daß sie nicht in jeder Umgebung wegen des Kommutierungsapparates einsetzbar ist oder sehr große Aufwendungen zur Kapselung und Belüftung erfordert. Asynchronmaschinen weisen diese Nachteile nicht auf. Im folgenden sollen Lösungswege und Probleme drehzahlgestellter ASM-Antriebe dargestellt werden. Da die Drehzahl n der ASM mit der Netzfrequenz f und der Polpaarzahl p festgelegt ist,

$$n = \frac{f}{p}, \qquad (1)$$

folgt, daß die Variation der Drehzahl zur Anpassung an den technologischen Prozeß des Antriebssystems nur möglich ist, wenn

1. die Polpaarzahl verändert wird. Das ermöglicht die Drehzahl nur in Sprüngen im Verhältnis ganzer Zahlen zu realisieren. Erreicht wird das durch polumschaltbare Wicklungen und/oder durch Motoren mit mehreren Wicklungen. Zusätzliche Anschlußklemmen sind erforderlich, die Ausnutzung des eingesetzten Materials wird ungünstiger, beides verteuert das Erzeugnis. Außerdem bleibt der Nachteil, daß die Drehzahl nur in Sprüngen (z.B. 1500 min^{-1}, 750 min^{-1}) verändert werden kann;
2. die Frequenz variiert wird. Hierzu wird eine Spannungsquelle benötigt, die das zu realisieren ermöglicht. Die moderne Stromrichtertechnik und die Mikroelektronik bilden dafür die Basis. Für die Anwendung der Drehstromantriebstechnik (DAT) bieten sich beispielsweise die in der Tafel 1 aufgeführten Gebiete an.

Mit Rücksicht auf erreichbare Effekte der Elektroenergieeinsparung wird deutlich, daß die Drehstromantriebstechnik zunehmende Bedeutung gewinnt. Es wird eingeschätzt, daß bis Mitte der 90er Jahre die Produktionsvolumina für drehzahlvariable Drehstromantriebe die der Gleichstromantriebe erreicht haben werden. Dabei kommt bei den Kosten ersteren zugute, daß — wie in der Tafel 2 dargestellt — Gleichstrommotoren wesentlich teurer als Asynchronmotoren sind. Diese Kostendifferenz kann für die aufwendigere Drehstromleistungselektronik verwendet werden.

Der erreichbare Effekt der Energieeinsparung sei am Beispiel eines Pumpenantriebes dargestellt (Bild 1). Bei Antrieb mit fester Drehzahl erfolgt die Mengenregelung durch Bypaß oder Drosselung. Beide Lösungen verursachen energetisch gesehen Verluste. Die Anwendung eines drehzahlveränderlichen Antriebes ermöglicht es, die im Bild 1 gezeigte Einsparung an Antriebsleistung zu realisieren.

Weitere Vorteile der Drehstromantriebstechnik liegen in dem vergleichsweise kleineren Bauvolumen des ASM. Das ist ein Kriterium, das z.B. für den An- oder Einbau in Maschinen von Bedeutung ist.

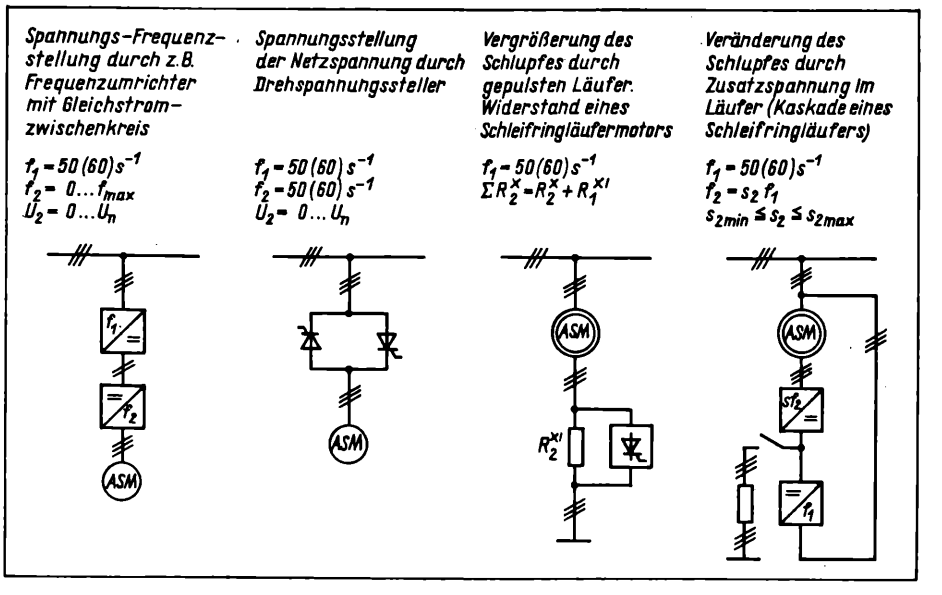
Tafel 1. Anwendungsgebiete der drehzahlgeregelten Drehstromantriebstechnik

Pumpen	Lüfter
Verdichter	Zentrifuge
Walzenstraßen	Fördermaschinen
Werkzeugmaschinen	Roboter
Textilmaschinen	Triebfahrzeuge

Tafel 2. Kostenvergleich von Gleichstrom- und Asynchronmotoren (normiert)

	Gleichstrommotor	ASM
1 kW	8 bis 10	1
100 kW	2,5	1
1000 kW	2,0	1

2



1. Betrieb des ASM mit veränderlicher Frequenz

Die grundsätzlichen Möglichkeiten sind im Bild 2 dargestellt. Sie werden im folgenden näher betrachtet. Wie leicht aus dem Ersatzschaltbild der ASM (Bild 3) zu erkennen ist, lautet die Gleichung für den das magnetische Feld aufbauenden Magnetisierungsstrom

$$I_\mu = \frac{U_1}{R_1 + j\,(X_{\sigma 1} + X_{12})}. \tag{2}$$

Da der Blindwiderstand $(X_{\sigma 1} + X_{12})$ viel größer ist als der ohmsche Widerstand des Stators, ist zu erkennen, daß mit sinkender Frequenz bei konstanter Netzspannung der Magnetisierungsstrom umgekehrt proportional zur Frequenz ansteigt. Bei $f = 0$ ist schließlich

$$I_\mu \doteq \frac{U_1}{R_1}. \tag{3}$$

Wegen der Sättigung des magnetischen Kreises ist eine Erhöhung des magnetischen Flusses nur durch überproportionale Steigerung des Magnetisierungsstromes erreichbar. Andererseits hat das eine beträchtliche Erhöhung des Stromwärmeverlustes im Stator und damit auch eine Erhöhung der Erwärmung zur Folge. Daher muß der Magnetisierungsstrom konstant gehalten werden. Das gelingt nur, wenn der Magnetisierungsstrom also auch der magnetische Fluß ψ konstant gehalten werden. Es läßt sich für den Zusammenhang von Magnetisierungsstrom bzw. magnetischem Fluß, Netzspannung und Netzfrequenz die Gleichung

$$U_1 = \omega_1 \psi \left[\left(\frac{1}{\omega_1}\,\frac{R_1}{L_{1\delta}} - \omega_2 \frac{L_{1\delta}}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\,\frac{R_1}{R_2} + \frac{L_{1\delta}}{L_{12}} + 1\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

ableiten. Sie zeigt, daß auch die Läuferfrequenz, d.h. die Motorbelastung, einen Einfluß auf den Zusammenhang der Netzspannung in Abhängigkeit von der Netzfrequenz hat. Das ist im Bild 4 dargestellt.

Wenn die Frequenz ihren Nennwert (50 s^{-1} oder 60 s^{-1}) erreicht hat, darf die Spannung nicht weiter erhöht werden. Sie ist konstant zu halten. Die Folge ist, daß nun wegen $R_1 \ll \omega_1 (L_{1\delta} + L_{12})$ für den Magnetisierungsstrom gilt $(\omega_2 \sim 0)$:

$$I_\mu = \frac{U_1}{\omega_1 (L_{1\delta} + L_{12})} = \frac{U_1}{\varepsilon\, \omega_{1n} L_1} \quad \text{mit}$$

$$\varepsilon = \frac{\omega_1}{\omega_{1n}} = \frac{f_1}{f_{1n}} \quad \text{und} \quad X_1 = X_{1\delta} + X_{12} = \omega_1 (L_{1\delta} + L_{12}). \tag{5}$$

Der Magnetisierungsstrom wird nun umgekehrt proportional mit der Frequenz kleiner. Damit wird auch der magnetische Fluß (ψ) kleiner. Für das Drehmoment gilt

$$M = I_1 \psi \cos \varphi_1, \tag{6}$$

wobei I_1 der Ständerstrom und ψ dessen Phasenwinkel ist.

Es sollen die beiden folgenden Betriebsbereiche betrachtet werden.

1. $0 < \omega_1 < \omega_{1n}$.

Hier ist, da der Strom $I_1 \cos \varphi$ konstant gehalten wird und wie oben gezeigt der magnetische Fluß ebenfalls konstant ist, auch das Drehmoment konstant:

$$\frac{M_1}{M_{1n}} = \text{konstant}.$$

Man spricht vom „Bereich konstanten Drehmoments". Die Leistung steigt proportional zur Frequenz

$$\frac{P_1}{P_{1n}} = \varepsilon.$$

2. $\omega_1 > \omega_{1n}$.

Hier wird wiederum beim festen Wert für $I_1 \cos \varphi$ wegen des mit steigender Frequenz sinkenden magnetischen Flusses das normierte Moment umgekehrt proportional zur Frequenz kleiner. Es gilt

$$\frac{M_1}{M_{1n}} = \frac{1}{\varepsilon}.$$

Die Leistung bleibt in diesem Bereich konstant. Man spricht daher vom „Bereich konstanter Leistung".

Im Betriebsdiagramm nach Bild 5 sind diese Zusammenhänge dargestellt. Wie zu erkennen ist, sind Frequenz und Spannung zu verändern. Man spricht daher von *Frequenz-Spannungs-Stellung* (*f-U-Stellung*).

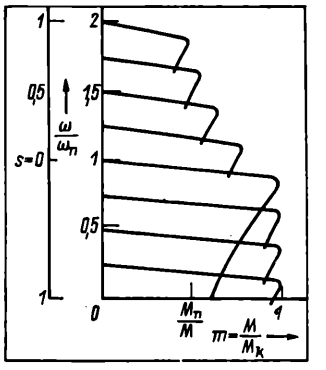


Bild 6. Drehzahl-Drehmoment bzw. Schlupf-Drehmoment-Kennlinie der ASM bei Frequenz-Spannungsstellung

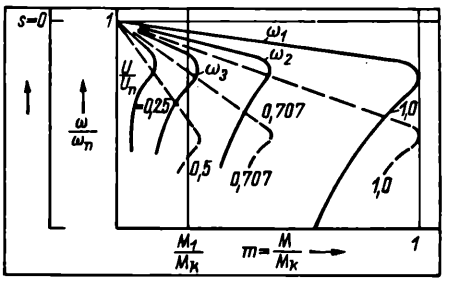


Bild 7. Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinien der ASM bei Spannungsstellung für $\frac{U}{U_n}$ = 1,0; 0,7; 0,5; 0,25 für Normal- (———) und Widerstandsläufer (– – – –)

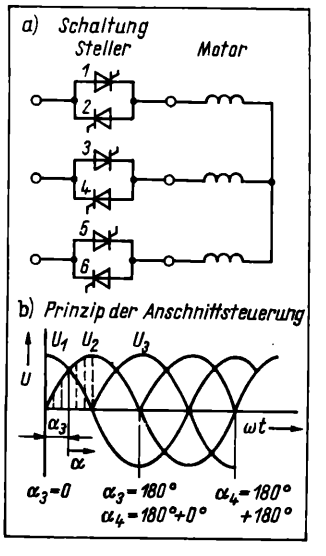


Bild 8. Drehspannungssteller

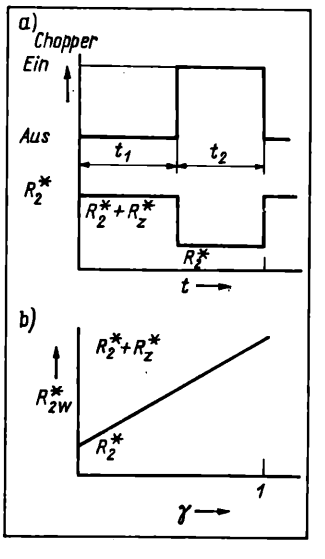


Bild 9. Schaltzeiten und Widerstand im Läuferkreis der ASM bei gepulstem Läuferwiderstand (a) und effektiver Läuferwiderstand (b) in Abhängigkeit von $\frac{t_1}{T}$

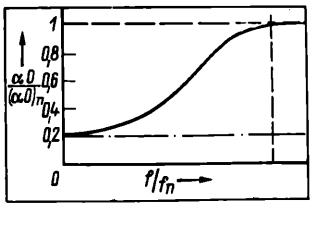


Bild 10. Wärmeabgabevermögen der Asynchronmaschine
-·-·-·- ohne Ventilator
– – – – mit separatem Ventilator
——— mit Eigenbelüftung (Ventilator auf der Motorwelle)

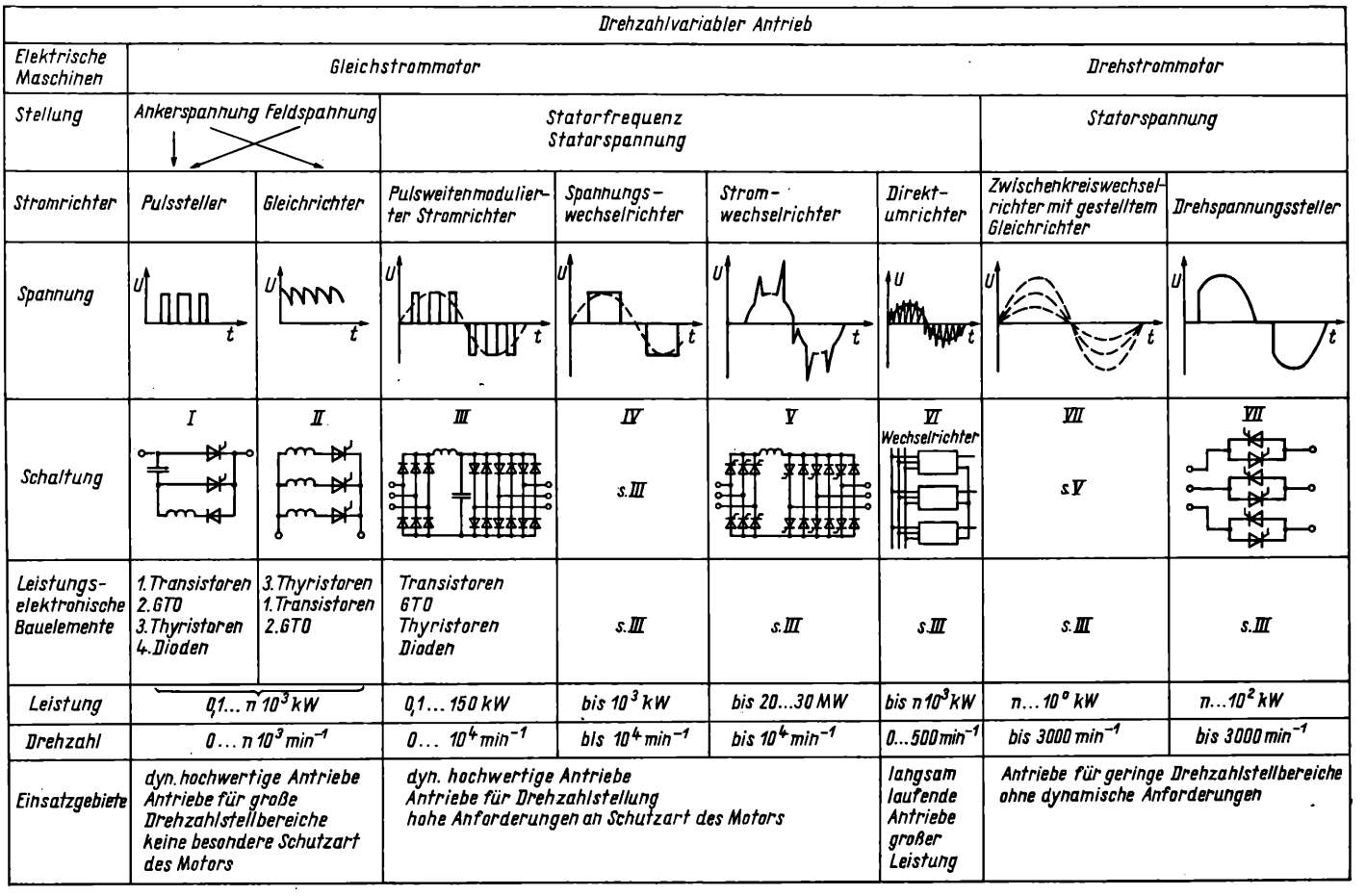


Bild 11. Drehzahlvariabler Antrieb

Für das Betriebsverhalten des ASM gibt dessen Kreisdiagramm Auskunft. ASM sind so auszulegen, daß sie bei kleinem Anlaufstrom bei direktem Zuschalten an das 50-Hz-Netz ein möglichst großes Anlauf- und Kippmoment erzeugen. Bei Speisung des Motors von einer frequenz- und spannungsgeregelten Stromquelle entfällt die Bedingung, denn der Motor kann mit Nennstrom vom Stillstand aus angefahren werden. Im Bereich oberhalb der Nennfrequenz ($\varepsilon > 1$) wird der magnetische Fluß und mit diesem auch das Moment kleiner. Für den Zusammenhang von Drehzahl und Moment ergibt sich Bild 6.

Weitere Möglichkeiten der Drehzahlstellung von ASM mit den Mitteln der Mikroelektronik und Leistungselektronik sind bei konstanter Netzfrequenz:

— Die Verringerung der Klemmenspannung durch einen Drehspannungssteller. Das Kippmoment wird mit dem Quadrat der Spannung bei konstantem Kippschlupf kleiner:

$$\frac{M_K}{M_{Kn}} \sim \left(\frac{U_1}{U_{1n}}\right)^2. \tag{7}$$

Damit neigt sich die Kennlinie steiler, der Drehzahlabfall wird mit steigendem Moment größer. Um diesen Effekt deutlich auszuprägen, gibt es Motoren mit vergrößertem Rotorwiderstand (R_2*), so daß der Kippschlupf nach Gl. (8) größer wird. Das ist im Bild 7 dargestellt:

$$s_k = \frac{R_2}{L_{\sigma 2}}. \tag{8}$$

Das Prinzip eines Drehspannungsstellers und seine Wirkungsweise sind im Bild 8 gezeigt.

— Die Vergrößerung des Kippschlupfes bei ASM mit Schleifringläufer durch Vergrößerung des Läuferwiderstandes. Es läßt sich zeigen, daß zur Realisierung eines vergrößerten Kippschlupfes $s_{k\,soll}$ der Wert des zusätzlich einzuhaltenden Widerstandes sich aus

$$R_z^* = R_2^* \left(\frac{s_{k\,soll}}{s_k} - 1\right) \tag{9}$$

ergibt. Das wird dadurch erreicht, daß der zusätzlich im Läuferkreis außerhalb des Motors aufgestellte Widerstand durch einen elektronischen Kurzschließer zu- und abgeschaltet wird. Mit dem Tastverhältnis

$$\gamma = \frac{t_1}{T}, \tag{10}$$

t Zeit, in der der Widerstand nicht kurzgeschlossen ist und
T Periodendauer,

folgt dann für den wirksamen Widerstand R_{2W} im Läufer die Darstellung nach Bild 9. Es gilt der Zusammenhang

$$R_{2W}^* = R_2^* \left[(1-\gamma) + \gamma \frac{s_{k\,soll}}{s_k}\right]. \tag{11}$$

— Einprägen einer zusätzlichen Spannung in den Läufer einer ASM mit Schleifringläufer. Diese Spannung muß die Läuferfrequenz haben. Sie wird durch einen Stromrichter erzeugt, der den Läuferkreis mit dem Netz verbindet. Zum Anlauf dient ein normaler Anlaßwiderstand.

Die Zusatzspannung kann nach Größe und Phase so eingeprägt werden, daß

- die Drehzahl gehoben oder gesenkt wird
- die Phasenlage des Netzstromes des Motors verändert wird
- die Drehzahl und die Phasenlage gleichzeitig beeinflußt werden.

Belüftung des ASM

Normalerweise sind ASM selbstbelüftet. Das erfolgt insbesondere bei den Standardmotoren durch Ventilatoren, die sich auf dem freien Wellenende befinden. Es ist klar, daß deren Wärmeabführvermögen ($\alpha \cdot O$) drehzahlabhängig ist (Bild 10). Dabei stellen α die Wärmeübergangsziffer in $\frac{W}{m^2\,K}$ und O die wärmeabgebende Oberfläche in m² dar. Bei stillstehendem Ventilator erfolgt die Wärmeabfuhr nur durch natürliche Konvektion, während bei Nenndrehzahl ein hohes Wärmeabgabevermögen vorhanden ist. Zwischen beiden Zuständen gibt es einen kontinuierlichen drehzahlabhängigen Übergang. Dem ist bei Betrieb mit reduzierter Drehzahl Rechnung zu tragen. Das kann entweder durch Reduktion der Dauerleistung oder durch den Einsatz eines Fremdlüfters erfolgen.

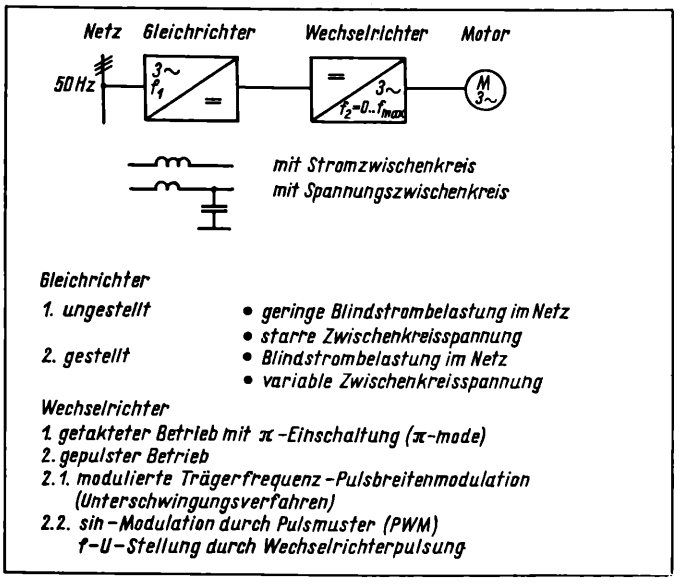


Bild 12. Betrieb vom Drehstromnetz
Zwischenkreiswechselrichter für *f-u*-Stellung

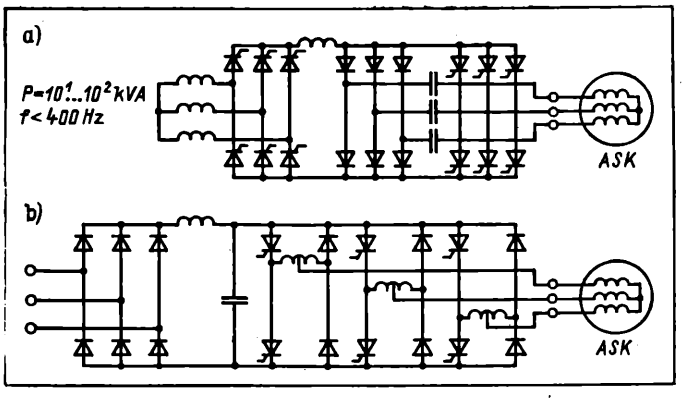


Bild 14. Zwischenkreis
a) Zwischenkreisumrichter mit Gleichstromzwischenkreis (IZKS)
b) Zwischenkreiswechselrichter mit Spannungszwischenkreis (UZKS)

2. Stromrichter zur Frequenz-Spannungs-Stellung

Aufgabe ist es, aus dem speisenden Netz elektrische Energie zu entnehmen und sie dem ASM als frequenz-spannungs-gestellte Energie zuzuführen.

Zur Wandlung der Energieform stehen Direktumrichter und Zwischenkreisumrichter (Bild 11) zur Verfügung. Hier sollen letztere weiter betrachtet werden, da sie vor allem in den Bereich von Motorleistungen von etwa 1 kW bis einige 1000 kW angewendet werden. Der Zwischenkreiswechselrichter besteht aus dem netz- und dem maschinenseitigen Stromrichter. Bei Motorbetrieb arbeitet ersterer als Gleichrichter und letzterer als Wechselrichter. Bei Bremsvorgängen können beide ihre Betriebsweise umkehren, falls auch der Gleichrichter mit steuerbaren leistungselektronischen Bauelementen bestückt ist. Der Zwischenkreis kann für konstanten Strom oder für konstante Spannung ausgelegt werden (Bild 12). Im ersten Fall wird das durch eine Induktivität und im zweiten Fall durch einen parallel geschalteten Kondensator erreicht. Man spricht von Strom-Zwischenkreis-Wechselrichter und von Spannungs-Zwischenkreis-Wechselrichter. Im folgenden sollen die einzelnen Baugruppen des Stromrichters näher betrachtet werden.

Netzseitiger Stromrichter — bei Motorbetrieb als Gleichrichter betrieben

In Abhängigkeit vom Ansteuerwinkel entnimmt der Stromrichter dem Netz eine Blindleistung (Bild 13). Sie geht beim Ansteuerwinkel Null — also umgestellten Betrieb — gegen Null. In diesem Fall liefert der Gleichrichter eine konstante Ausgangsspannung in den Zwischenkreis. Es gilt für die Zwischenkreisspannung

$$U_{d0} = 2{,}34 \cdot U_1 \cos \alpha. \qquad (12)$$

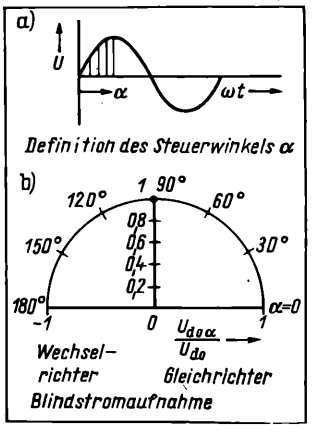
U_1 Netzspannung, α Ansteuerwinkel.

Erwünscht ist aus der Sicht der Netzbelastung der ungestellte netzseitige Stromrichter.

Der maschinenseitige Stromrichter wird vom Zwischenkreis gespeist. Im Fall des konstanten Zwischenkreisstromes ist zur Veränderung des Motorstromes und mit diesem des Motormoments ein gestellter netzseitiger Stromrichter erforderlich. Der Strom wird dem Motor eingeprägt. Im Fall einer konstanten Spannung im Zwischenkreis kann die Amplitude der Motorpsannung nicht variiert werden. Daher muß die Ausgangsspannung durch Pulse gebildet werden, die sowohl die richtige Frequenz als auch die richtige Amplitude der Spannung ergeben. Es wird in Betriebsart mit Taktung oder π-Einschaltung und Pulsung unterschieden. Die Frequenz der Ausgangsspannung ist durch die Periodendauer der Taktung oder des Pulsmusters bestimmt. Sie wird durch eine mikroelektronische Ansteuereinheit realisiert, die die leistungselektronischen Bauelemente im gewünschten Rhythmus zündet und löscht. Die Schaltungen für die Wechselrichter zeigt das Bild 14. Im Bild 15 sind die zeitlichen Verläufe für die Ventileinschaltungen, die sich ergebenden verketteten und Phasenspannungen dargestellt, und zwar für den getakteten Spannungswechselrichter (Bild 15a), für den gepulsten Spannungswechselrichter (Bild 15b) und für den getakteten Stromwechselrichter (Bild 15c). Die sich ergebenden zeitlichen Verläufe der Ströme und Spannungen zeigt Bild 16. Der Vorteil des gepulsten Spannungswechselrichters wird deutlich, wenn man die Pulsfrequenz einige Kilohertz hoch wählt, da man dann praktisch wieder sinusförmigen Strom erhält. Die realisierbare Frequenz hängt in hohem Maße von den eingesetzten leistungselektronischen Bauelementen ab (Tafel 3).

Wie noch zu zeigen ist, verursachen die von der Sinus-Form abweichenden Spannungen und Ströme zusätzliche Verluste im Motor. Wie oben bemerkt, werden diese Größen um so sinusförmiger, je höher die Pulsfrequenzen sind. Damit wird deutlich, daß mit steigender Pulsfrequenz die im Motor entstehenden Verluste sinken. Die leistungselektronischen Bauelemente haben die folgenden Verluste: Einschalt-, Ausschalt-, Sperr- und Durchlaßverluste. Von diesen sind die Sperrverluste relativ klein. Die Durchlaßverluste sind nur von der Belastung abhängig. Ein- und Ausschaltverluste jedoch treten bei jeden Ein- bzw. Ausschaltvorgang auf. Sie sind von der Pulsfrequenz bestimmt. Für die Verluste im maschinenseitigen Stromrichter und dem Motor ergeben sich somit die im Bild 17 gezeigten Zusammenhänge. Es ist zu ersehen, daß die Summe „Motor- und Stromrichterverluste" ein Minimum haben. In welch hohem Maße der Aufwand an Bauelementen von der Art der verwendeten leistungselektronischen Bauelemente abhängig ist, zeigt Bild 18. Dort sind neben den funktionsbedingten Komponenten auch die Bauelemente, die zur Beschaltung erforderlich sind, angegeben. Der Vorteil von GTO und Transistoren ist deutlich zu erkennen. Der Stromzwischenkreis-Wechselrichter erfordert einen netzseitigen Stromrichter, der gestellt sein muß, damit die Amplitude des Stromes im Zwischenkreis und damit auch der motorseitige Strom variiert werden kann. Der Spannungszwischenkreis-Wechselrichter, im getakteten Betrieb gefahren, erfordert ebenfalls einen netzseitigen Stromrichter, der gestellt betrieben wird. In beiden Fällen ergibt sich damit die unerwünschte Blindstrombelastung im speisenden Netz. Diesen Nachteil vermeidet der gepulste Spannungszwischenkreis-Wechselrichter, da es hier möglich ist, durch die Wahl des Pulsmusters Frequenz und Amplitude der motorseitigen Spannung variieren zu können.

Bild 13. Blindstromaufnahme des gestellten Stromrichters



Tafel 3. Technisch realisierte Frequenzen mit modernen leistungselektronischen Bauelementen

Power MOSFET	> 25,0 kHz
Leistungstransistoren	< 25,0 kHz
GTO	0,5 bis 1,0 kHz
Schnelle Thyristoren	0,2 bis 0,3 kHz

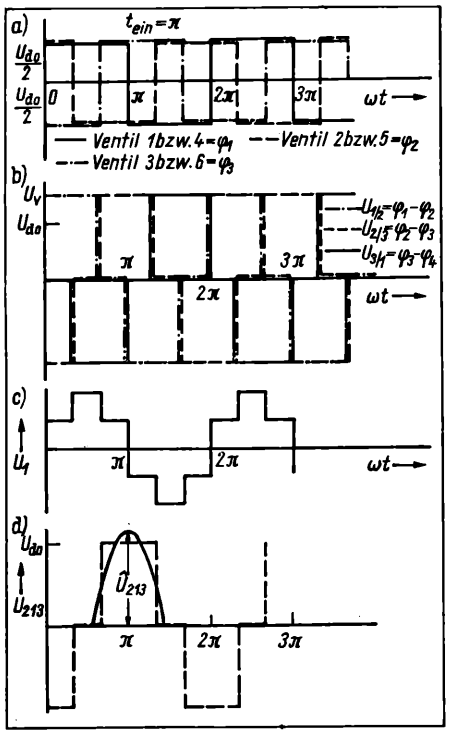


Bild 15. Betriebsweise

a) des Spannungswechselrichters bei getaktetem Betrieb
a Potentiale, *b* verkettete Spannungen, *c* Phasenspannungen, *d* Darstellung einer verketteten Spannung U_{213}
b) eines Pulsmusters zur Erzeugung einer Wechselspannung (PWM)
a Unterschwingungsverfahren
b Pulsbreitenmodulation
c) des Stromwechselrichters
a Ventilstrom
b verketteter Strom
c Phasenstrom

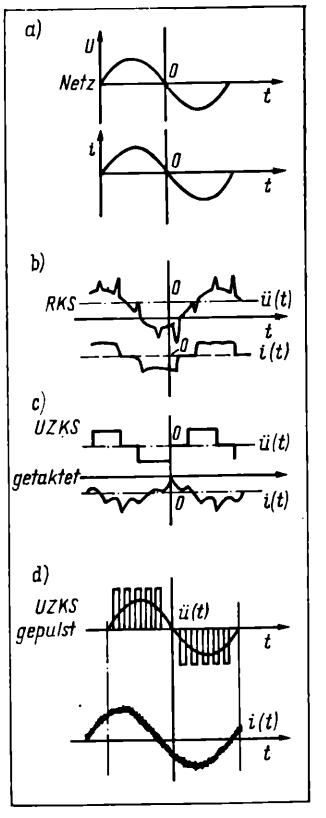


Bild 16. Zeitlicher Verlauf der Spannungen und Ströme

a) bei Netzbetrieb
b) bei Betrieb mit getaktetem Stromwechselrichter
c) Spannungswechselrichter getaktet
d) mit Spannungsrichter gepulst ▶

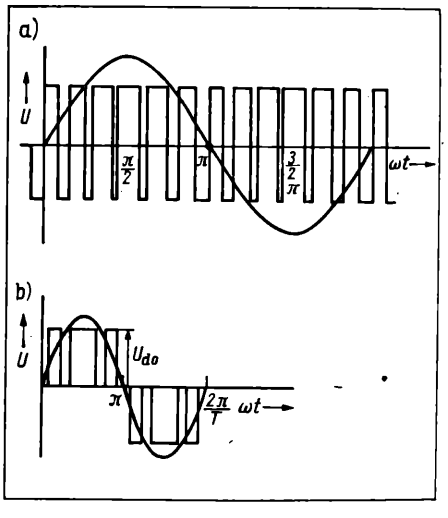


Bild 17. Verlustleistung in Abhängigkeit von der Frequenz (prinzipiell) ▶

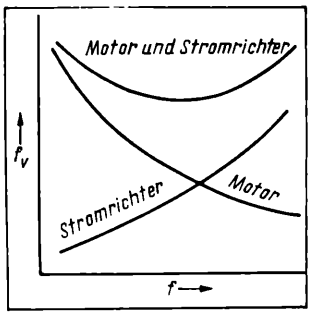
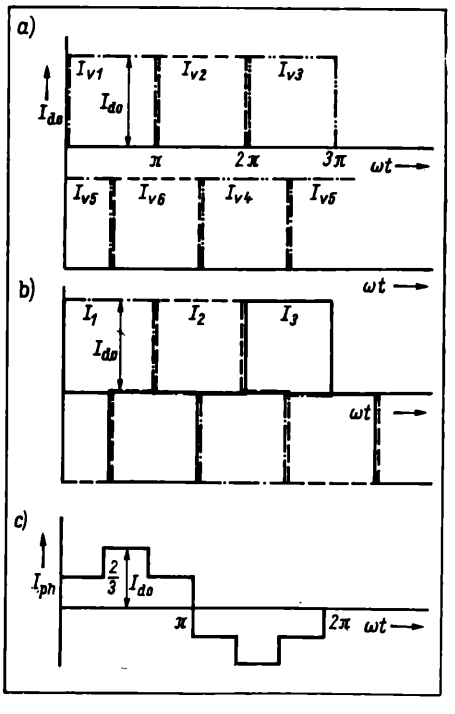
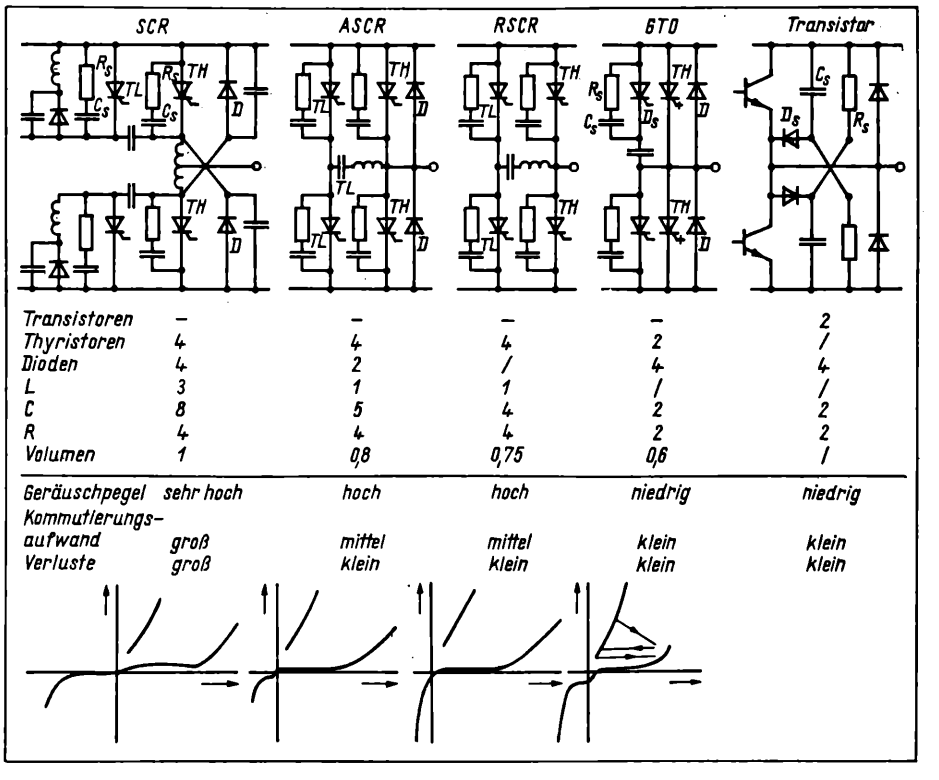


Bild 18. Schaltbild eines WR-Brückenzweiges

SCR	Thyristor
ASCR	asymmetrischer Thyristor
RSCR	rückwärtsleitender Thyristor
TH	Hauptthyristor
D	Freilaufdiode
TL	Löschthyristor
$R_S; C_S; D_S$	Schutzbeschaltung ▼





	SCR	ASCR	RSCR	GTO	Transistor
Transistoren	–	–	–	–	2
Thyristoren	4	4	4	2	/
Dioden	4	2	/	4	4
L	3	1	1	/	/
C	8	5	4	2	2
R	4	4	4	2	2
Volumen	1	0,8	0,75	0,6	/
Geräuschpegel	sehr hoch	hoch	hoch	niedrig	niedrig
Kommutierungs-aufwand	groß	mittel	mittel	klein	klein
Verluste	groß	klein	klein	klein	klein

3. Einfluß der Stromrichterspeisung auf das Betriebsverhalten der ASM bei Speisung von Spannungszwischenkreis-Wechselrichter

3.1. Ströme

Die folgenden Betrachtungen werden für getakteten und gepulsten Betrieb durchgeführt. Bei getaktetem Betrieb ergaben sich die Spannungen als Rechteckblöcke, die dem Motor eingeprägt werden. Eine Harmonische Analyse ergibt:

$$U_{(t)} = U_1 \left[\sin \omega_1 t - \frac{1}{5} \sin 5\,\omega_1 t + \frac{1}{7} \sin 7\,\omega_1 t - \cdots \right]. \tag{13}$$

Es läßt sich zeigen, daß nur die folgenden Harmonischen auftreten:

$$\gamma = 1 \pm 6\,g \text{ mit } g = 1, 2, 3 \ldots \tag{14}$$

Die Amplituden der Harmonischen Spannungen sinken mit steigender Ordnungszahl, so daß sich für die normierten Werte ergibt:

U_5/U_1	U_7/U_1	U_{11}/U_1	U_{13}/U_1	U_{17}/U_1	U_{19}/U_1
0,2	0,14	0,0909	0,077	0,059	0,052.

Für die von diesen Spannungen angetriebenen Ströme gilt, daß sie im Ersatzschaltbild der ASM (Bild 3) nicht durch die Gegeninduktivität X_{12} fließen. Sie sind also durch den Stromkreis, bestehend aus R_1^*; $X_{\sigma 1}$; $R_2^* + \mathrm{j}\, X_{\sigma 2}^*$ bestimmt.
Damit gilt für sie:

$$I_{1\nu} = \frac{U_{1\nu}}{R_1 + R_2^* + \mathrm{j}\,(X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}^*)}. \tag{14}$$

Da mit steigender Frequenz die Blindwiderstände ansteigen, kann näherungsweise geschrieben werden:

$$I_{1\nu} \sim \frac{U_{1\nu}}{\mathrm{j}\,2\,\pi f_{1\nu} (L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}^*)}. \tag{15}$$

Da andererseits

$$U_{1\nu} = \frac{U_1}{\nu} \tag{16}$$

war, folgt

$$I_{1\nu} \sim \frac{U_1}{2\,\pi f_{1\nu}^2 (L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}^*)}. \tag{17}$$

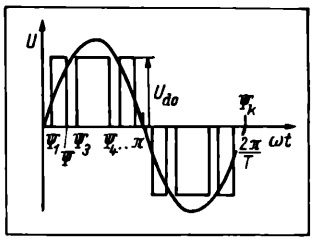
Das bedeutet, daß die Ströme der Harmonischen mit steigender Ordnungszahl rasch kleiner werden. Bei gepulster Spannung können die Harmonischen mit der aus dem Fourierintegral abgeleiteten Gleichung

$$U_\nu = \frac{4}{\pi} \frac{U_{d0}}{\nu} \sum_1^g (-1)^i \sin \nu\, \psi_i \tag{18}$$

berechnet werden. Dabei sind ψ_i die Schaltwinkel der Pulse in Bild 19. Beispiele für 40 Hz, 30 Hz und 20 Hz zeigt das Bild 20. Ströme hoher Frequenzen verursachen in den Käfigwicklungen der Läufer erhebliche Stromverdrängungseffekte. Das zeigt Bild 21 für die Frequenzen 300 Hz und 1000 Hz. Es ist zu erkennen, daß große Anteile des Stromes durch die Teile III und IV der Nut fließen. Dort ist ein erheblich größerer Widerstand vorhanden als ihn der gesamte Querschnitt bietet. Es tritt eine Erhöhung des Wirkwiderstandes um den Faktor k_r und gleichzeitig eine Verringerung des Blindwiderstandes um den Faktor k_i auf. Diese Faktoren sind von der Nutzgeometrie, dem Leitermaterial in der Läufernut und der eingeprägten Frequenz abhängig.

3.2. Verluste im aktiven Material

Die Verluste im aktiven Material setzten sich aus den Ummagnetisierungsverlusten und den Stromwärmeverlusten zusammen. Erstere werden durch die Harmonischen Ströme nur wenig beein-



19

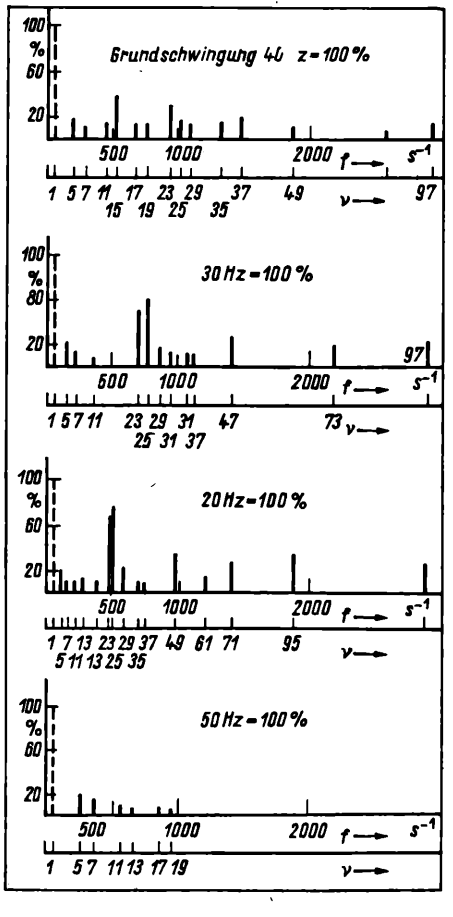
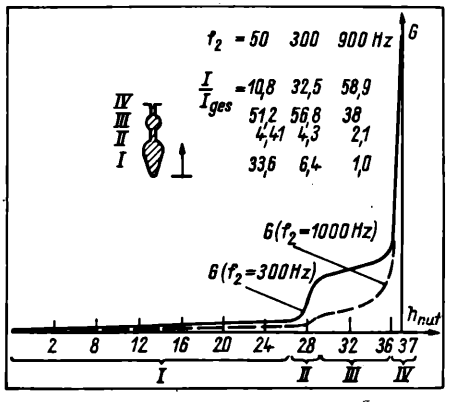


Bild 19. Beispiel eines Pulsmusters zur Erzeugung einer Wechselspannung (PWM) Pulsbreitenmodulation

Bild 20. Frequenzspektrum bei getaktetem (50 Hz) und gepulstem Spannungswechselrichter (40, 30, 20 Hz)



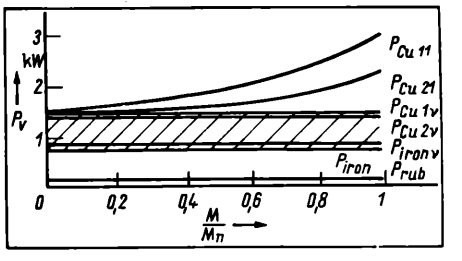


Bild 22. Motorverluste in Abhängigkeit vom Moment

Bild 21. Stromdichteverteilung in Doppelkäfigwicklung ◀

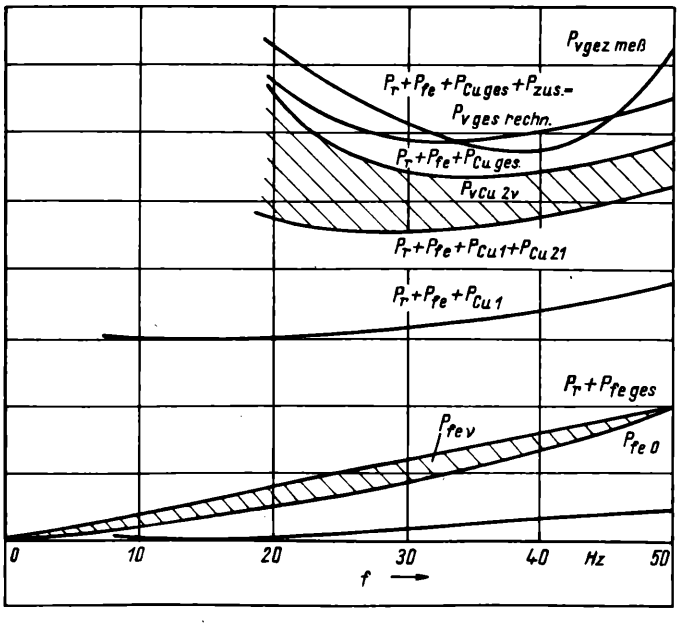
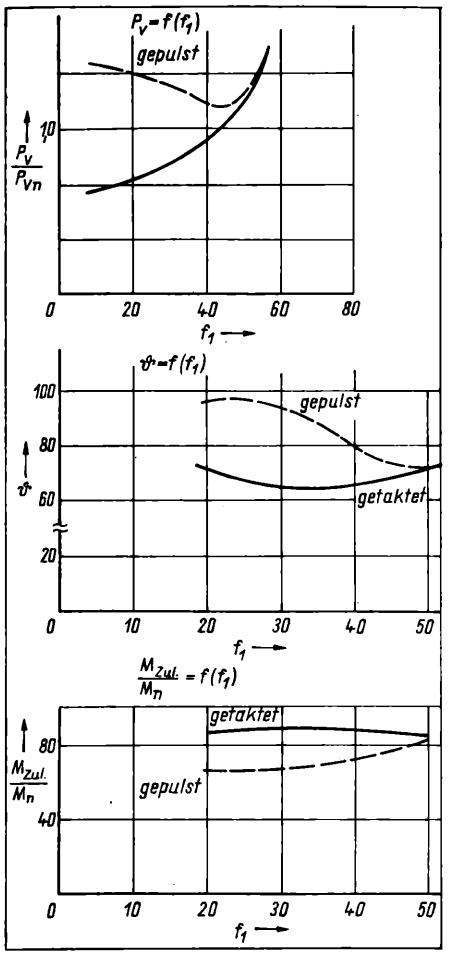


Bild 23. Verluste in Abhängigkeit von der Frequenz bzw. Pulswechselrichterbetrieb



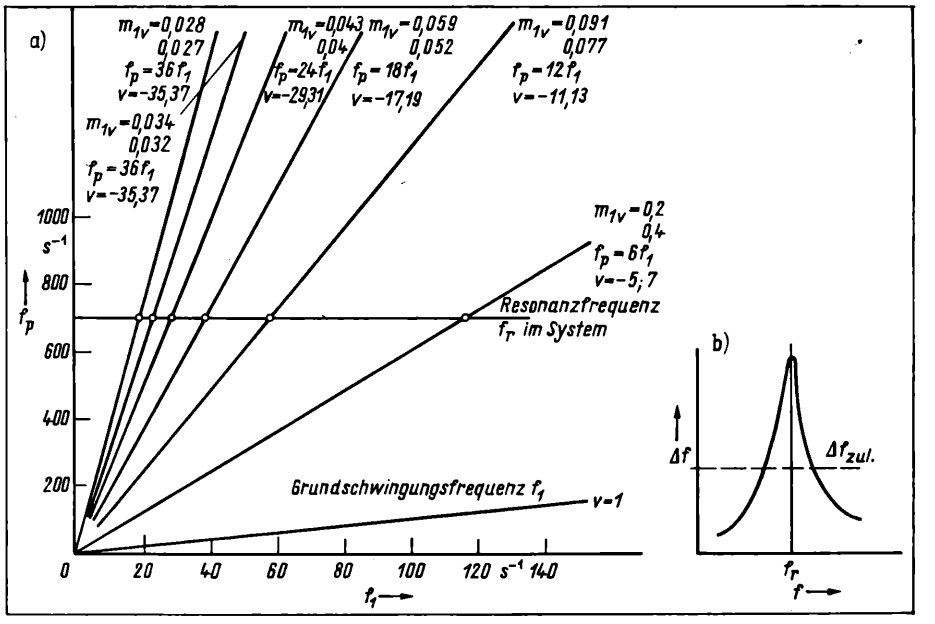
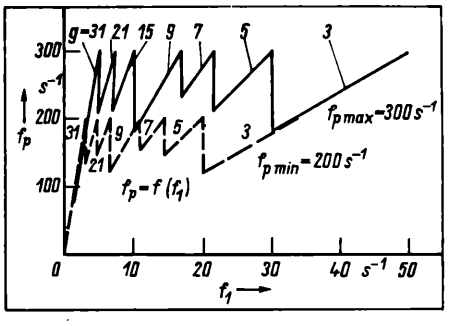


Bild 24. Motorverluste $\left(\frac{P_v}{P_{vn}}\right)$, Erwärmung ($\vartheta$) und zulässiges Drehmoment $\left(\frac{M_{zul.}}{M_n}\right)$ in Abhängigkeit von der Drehzahl bei getaktetem und gepulstem Betrieb für einen Motor ◀

Bild 25. Frequenz f_p der Pendelmomente in Abhängigkeit von der Grundwellenfrequenz f_1 mit Angabe der kritischen Drehzahl (a) und Resonanzkurve (b): Torsionsschwingungsamplitude in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz

Bild 26. Pulsfrequenz f_p und Gangzahl g in Abhängigkeit von der Grundschwingungsfrequenz f_1 bei f_{pmax} = 200 und 300 Hz ▶



flußt. Sie ändern sich jedoch beachtlich mit der Frequenz der Grundschwingung. Für die Verlustziffer gilt

$$V_{1,0} = \varepsilon f B^2 + \sigma f^2 B^2 \tag{19}$$

in $\frac{W}{kg}$. Damit ist zu erkennen, daß bei steigender Drehzahl (entsprechend Grundschwingung) die Ummagnetisierungsverluste stark ansteigen. Für die Stromwärmeverluste gilt im Stator:

$$P_{Cu1} = 3 I_1^2 R_1 + 3 \sum_{g=1}^{n} I_{1\nu}^2 k_{r\nu 1} R_1 \tag{20}$$

und im Läufer

$$P_{Cu2} = 3 I_2^2 R_2 + 3 \sum_{g=1}^{n} I_{2\nu}^2 k_{r\nu 2} R_2 . \tag{21}$$

Es lassen sich 2 wesentliche Gesetzmäßigkeiten zeigen:

1. Bei konstanter Drehzahl
treten durch die Harmonischen Ströme zusätzliche Verluste auf, die von der Belastung unabhängig sind (Bild 22).
2. Bei konstantem Moment und veränderlicher Frequenz
ergibt sich z.B. für einen 4poligen 35-kW-Motor für den Verlusthaushalt die Darstellung im Bild 23.

Werden gepulster und getakteter Betrieb im Frequenzbereich 0 bis 50 Hz verglichen, so ergeben sich für Verluste, Erwärmung und zulässiges Moment die Ergebnisse im Bild 24.

3.3. Drehmomente

Das Drehmoment wird durch die Wechselwirkung von Strömen und magnetischen Luftspaltflüssen gebildet. Da der Luftspaltfluß praktisch nur von der Grundwelle des Ständerstromes gebildet wird, ergibt sich mit der grundsätzlichen Gleichung für das normierte Moment

$$m = I_m \{\psi_1 I_2\}. \tag{22}$$

Bei getaktetem Betrieb folgt dann leicht für die auftretenden Momente:

1. Moment der Grundschwingungen, zeitkonstant,
2. Momente der Grundschwingung des Flusses und der Harmonischen Ströme

Da wegen Gl. (10) die Ströme der z.B. 5. Oberschwingung gegen das Drehfeld laufen, erzeugen sie ein zeitlich veränderliches Moment — ein Pendelmoment — der 6fachen Grundschwingungsfrequenz. Die 7. Oberschwingung hingegen rotiert mit dem Luftspaltfeld. Daher erzeugt auch sie eine Frequenz des Pendelmomentes von 6facher Grundschwingungsfrequenz. Analog gilt das für die Paare 11 und 13; 17 und 19 usw. Es treten also Pendelmomente der Frequenz

$$f_p = n \cdot 6 \cdot f_1 \tag{23}$$

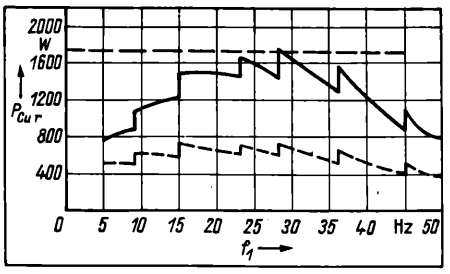
auf. Bei getaktetem Betrieb ist ihre Amplitude leicht zu bestimmen:

$\nu = 5$	$f_p = 6 \cdot f_1$	$m_5 = 0{,}2$
$\nu = 7$	$f_p = 6 \cdot f_1$	$m_7 = 0{,}14$
$\nu = 11$	$f_p = 12 \cdot f_1$	$m_n = 0{,}0909$
$\nu = 13$	$f_p = 12 \cdot f_1$	$m_{13} = 0{,}077$
$\nu = 17$	$f_p = 18 \cdot f_1$	$m_{17} = 0{,}059$
$\nu = 19$	$f_p = 18 \cdot f_1$	$m_{19} = 0{,}052$
$\nu = 23$	$f_p = 24 \cdot f_1$	$m_{23} = 0{,}043$
$\nu = 25$	$f_p = 24 \cdot f_1$	$m_{25} = 0{,}04$

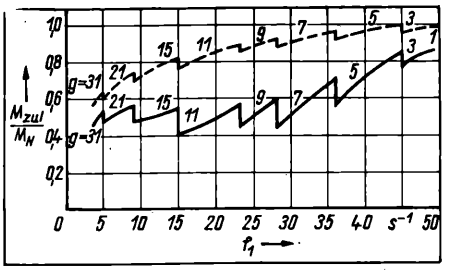
Sind diese Amplituden auch klein, so können sie doch Resonanzanfachung hervorrufen.
Bei gepulstem Betrieb ergeben sich — wie Bild 20 zeigt — völlig andere Stromharmonische. Dementsprechend muß für jedes Pulsmuster die harmonische Analyse gemacht werden. Mit den normierten Stromharmonischen folgen sofort die normierten Amplituden der Pendelmomente. Das Ergebnis für ein Beispiel ist im Bild 25 gezeigt. Im gesamten Drehzahlbereich sind die 6fachen Pendelmomente größer 10% von der Grundwelle. Ähnliche Werte treten in bestimmten Bereichen für 12- bis 36fache Pendelmomente auf. In den Schnittpunkten mit der Resonanzfrequenz des Antriebes kann die Anfachung erheblicher Resonanzschwingungen auftreten. Um das zu vermeiden, muß das Pulsmuster verändert werden. Durch Variation eines Schaltwinkels nach Bild 15 kann jeweils eine Harmonische zu Null gemacht werden. Man strebt danach, die niederfrequenten Pendelmomente zu vermeiden, da sie durch die trägen Massen die geringste Dämpfung erfahren.

3.4. Programm PEMOVER

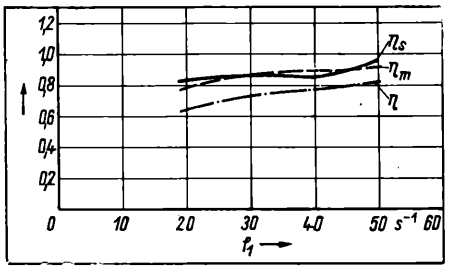
Die Berechnung der harmonischen Analyse, der Stromkomponenten,



27



28

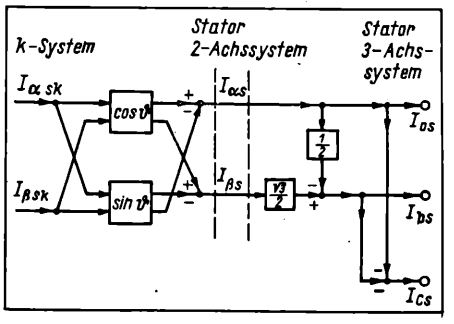


29

Bild 27. Oberschwingungsverluste $P_{Cu\,\psi}$ eines 35-kW-Motors bei Betrieb mit Spannungswechselrichter für Nutform 1 und Nutform 2 im Rotor

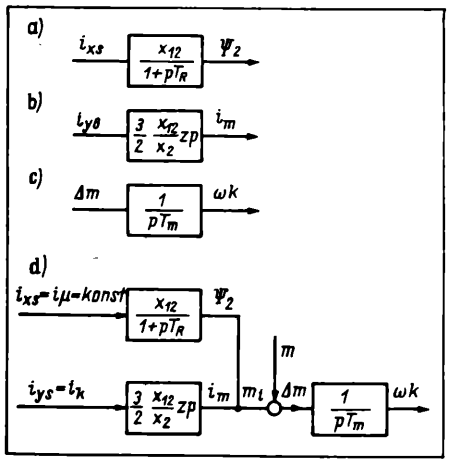
Bild 28. Momentreduktion eines 35-kW-Motors bei Betrieb mit Spannungswechselrichter für Nutform 1 und 2 im Rotor mit Selbstbelüftung

Bild 29. Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Grundschwingungsfrequenz
Stromrichter n_s
Motor n_m
Antrieb n



30

Bild 30. Signalflußbild der ASM
a) x-Achse
b) y-Achse
c) Moment
d) Gesamtes Flußbild



31

Bild 31. Schema der Koordinatentransformation vom k-System in das 3phasige System

der Stromverdrängung, der Stromwärmeverluste, der Pendelmomente und des zulässigen Grundwellendrehmomentes ermöglicht das Programm PEMOVER.

4. Betrieb des frequenz-spannungs-gestellten ASM

Da im gepulsten Betrieb ein fester Zusammenhang zwischen Pulsfrequenz und gewünschter Frequenz gemäß

$$f_p = 2\,g\,f_1 \tag{24}$$

besteht, muß $f_p < f_{max}$ sein. Das ist die unter dem Gesichtspunkt der Schaltverluste maximal zulässige Frequenz der leistungselektronischen Bauelemente. Die Zahl g ist die sog. Gangzahl; sie sagt, mit wieviel Pulsen eine Halbwelle der Spannung gebildet wird. Für z.B. $f = 200$ bzw. 300 Hz ergeben sich dann die im Bild 26 gezeigten Pulsfrequenzen in Abhängigkeit von der Grundwellenfrequenz. Da sich mit dem Pulsmuster die spektrale Zusammensetzung der Spannungen verändert, zeigen auch die Verluste einen frequenzabhängigen Verlauf. Das spiegelt sich auch im Verlauf der zulässigen Momente wider (Bilder 27 und 28). Für den Betrieb ist schließlich noch der Wirkungsgrad von Interesse. Er setzt sich aus dem des Motors und des Stromrichters (Gleichrichter und Wechselrichter) zusammen (Bild 29). Schließlich ist noch zu beachten, daß der Geräuschpegel infolge der harmonischen Ströme ansteigt.

5. Dynamisches Verhalten der ASM

Bei zahlreichen Antriebsaufgaben wird gutes dynamisches Verhalten gefordert. In diesem Fall wird die „Feldorientierte Regelung" angewandt. Ausgehend von den 6 Grundgleichungen für Spannungen, magnetische Flüsse und Drehmoment läßt sich das im Bild 30 dargestellte Signalflußbild der ASM ableiten. Es ist in einem fiktiven 2-Koordinatensystem dargestellt. Daraus kann es mit Hilfe der Mikrorechentechnik in das 3phasige Statorsystem (Bild 31) transformiert werden.

Spannungsgleichungen

$$\underline{U}_1^k = \underline{I}_1^k R_1 + \frac{\mathrm{d}\,\underline{\psi}_1^k}{\mathrm{d}\,t} + \mathrm{j}\,\omega\,k\,\underline{\psi}_1^k, \tag{25}$$

$$\underline{U}_2^k = I_2^k R_2 + \frac{\mathrm{d}\,\psi_2^k}{\mathrm{d}\,l} + \mathrm{j}\,(\omega - \omega_k)\,\underline{\psi}_2^k. \tag{26}$$

Motormoment

$$M = \frac{B}{2} Z_p\,\mathrm{Im}\,\{\psi_1 I_1^*\}. \tag{27}$$

Magnetische Flüsse

$$\underline{\psi}_1 = \underline{I}_1 L_1 + \underline{I}_2 L_{12}, \tag{28}$$

$$\underline{\psi}_2 = \underline{I}_1 L_{12} + \underline{I}_2 L_2. \tag{29}$$

Bewegungsgleichung

$$I\frac{\mathrm{d}\,\omega}{\mathrm{d}\,t} + M_L = \frac{3}{2} Z_p I_m\,\{\underline{\psi}_1 \underline{I}_1^*\}. \tag{30}$$

Literatur

[1] *Muster, J.:* Beanspruchung umrichtergespeister Asynchronmaschinen. TH Karl-Marx-Stadt: Dissertation 1984

[2] *Zimmermann, R.:* Zur Drehmomentenbildung in der mit Wechselrichter gespeisten Asynchronmaschine. TH Karl-Marx-Stadt: Dissertation 1984

[3] *Budig, P.-K.:* Some Remarks to the Design of Thyristor-Supplied Asynchronous Motors. Proc. ICEM, Lausanne, 1984

[4] *Budig, P.-K.:* Drehzahlvariable elektrische Antriebe zur Lösung von Antriebsaufgaben im Be- und Verarbeitungsmaschinenbau. Wiss. Z. der TH Karl-Marx-Stadt 26 (1984) 4, S. 564–576.

EA 5891

Thyristorschweißumrichter

W. Fischer, KDT; H. Mecke, KDT; Magdeburg

1. Stromquellen für das Lichtbogenschweißen

Das Lichtbogenschweißen ist als effektive Fügetechnologie in nahezu allen Bereichen der metallverarbeitenden Industrie unverzichtbar geworden. Die zur Energieanpassung eingesetzten Stromquellen wurden und werden entsprechend dem jeweiligen Erkenntnis- und Entwicklungsstand ständig weiterentwickelt. Der Übergang von den mechanisch robusten rotierenden Umformern zu den statischen Stromquellen, bestehend aus Transformator, ungesteuerten Gleichrichter und magnetischer Kennlinienverstellung, verbesserte das Masse-Leistungs-Verhältnis, den Wirkungsgrad und die Möglichkeiten der Prozeßanpassung. Der Einsatz von Thyristoren als steuerbare Halbleiterventile führte zu den heute weit verbreiteten, meist sekundärseitig gesteuerten Schweißgleichrichtern. Sie haben einen großen Stellbereich bei günstigem Masse-Leistungs-Verhältnis und eine gegenüber magnetischen Stellprinzipien höhere Stellgeschwindigkeit. Derartige Schweißgleichrichter sind gegenwärtig die für das automatisierte Schweißen am häufigsten angewendeten Stromquellen. Neben Schweißstromquellen mit Gleichstromausgang haben Schweißtransformatoren insbesondere im Heimwerkerbereich Bedeutung erlangt.

Konventionelle Schweißstromquellen haben ein hohes technisches Niveau. Weltweit werden Anstrengungen unternommen, auch auf dem Gebiet der Schweißstromquellen neue Stellprinzipien anzuwenden, um bessere Schweißeigenschaften und einen höheren Veredlungsgrad des eingesetzten Materials bei günstigerer Energieausnutzung zu erzielen. Die Verfügbarkeit neuer leistungselektronischer Bauelemente beschleunigt diesen Trend. Seit etwa 10 Jahren spielen elektronische Schweißstromquellen eine immer größere Rolle. Im Unterschied zu den erwähnten konventionellen Stromquellenprinzipien wird hier ein von der Netzfrequenz unabhängiges Stellprinzip verwendet. Im wesentlichen können drei derartige Gerätegruppen unterschieden werden [1]:

— sekundärseitig analog gesteuerte Stromquellen
— sekundärseitig getaktete Stromquellen
— primärseitig getaktete Stromquellen (Schweißumrichter).

Während die sekundärseitig gesteuerten Stromquellen nach wie vor einen mit Netzfrequenz betriebenen Transformator erfordern, erfolgt bei Schweißumrichtern Energieanpassung und Potentialtrennung auf Mittelfrequenzebene. Der Wechselrichter dient sowohl der Mittelfrequenzerzeugung als auch als schnelles Stellglied zur Prozeßanpassung. Neben prozeßtechnischen Vorteilen ist eine Masse- und Volumenreduzierung um 70 bis 80 % auf diese Weise erreichbar. Je nach verwendeten Leistungshalbleitern beträgt die Wechselrichterfrequenz bei Schweißumrichtern gegenwärtig:

— 5 kHz bei konventionellen Frequenzthyristoren
— 20 kHz bei Hochvolt-Bipolartransistoren oder Thyristormodifikationen
— 20 kHz bei Hochvolt-Bipolartransistoren oder Thyristormodifikationen
— 50 kHz bei Leistungs-FET.

Zwischenkreisumrichter werden in der Elektrotechnologie schon seit langem dort angewendet, wo die technologische Wirkung des mittelfrequenten Stromes ausgenutzt wird. Bekanntestes Beispiel ist die Induktionserwärmung. Zwischenkreisumrichter auch als Stromquelle für solche elektrotechnologischen Verfahren einzusetzen, die nicht ursächlich der Mittelfrequenz bedürfen, führt zu einem bedeutenden Fortschritt sowohl aus material- und energieökonomischer Sicht als auch im Hinblick auf die technologischen Eigenschaften der Stromquelle. Am Beispiel Schweißumrichter wird deutlich, daß, aufbauend auf bekannten Schaltungsprinzipien und ihrer theoretischen Beschreibung, eine Reihe neuer Probleme der Lösung bedürfen, die vor allem aus dem Zusammenwirken zwischen Umrichterstromquelle und technologischem Prozeß resultieren.

Dr.-Ing. *Wolfgang Fischer* ist wissenschaftlicher Assistent und Prof. Dr. sc. techn. *Hubert Mecke* ist Leiter des Wissenschaftsbereiches Elektrotechnologische Verfahren und Anlagen an der Sektion Automatisierungstechnik und Elektrotechnik der Technischen Universität „Otto von Guericke" Magdeburg.

2. Anforderungen des Schweißprozesses an die Stromquelle

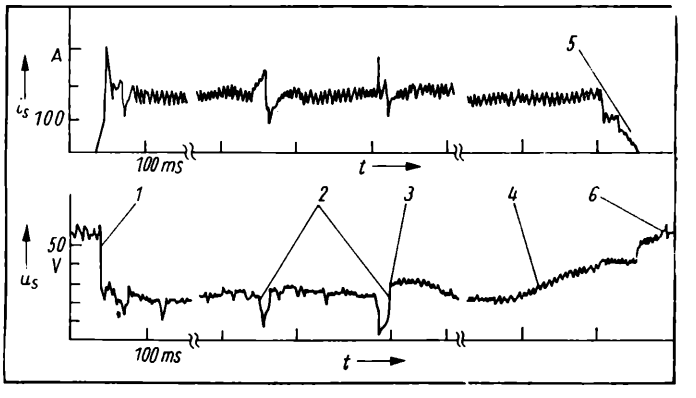
Der Schweißprozeß stellt ein stochastisches Auftreten unterschiedlicher Belastungsfälle dar. Man unterscheidet die quasistationären Zustände Leerlauf, Lichtbogenlast und Kurzschluß sowie die in sehr unterschiedlichen Zeitbereichen (ns bis ms) ablaufenden Übergangsvorgänge. Von diesen finden derzeit die im Mikro- bis Millisekundenbereich ablaufenden Vorgänge, wie beispielsweise

— Lichtbogenerstzündung
— Werkstofftransfer unter Kurzschlußbildung (Tropfenkurzschluß)
— Werkstofftransfer ohne Kurzschlußbildung
— Lichtbogenwiederzündung
— Lichtbogenabriß

besondere Beachtung. Bild 1 verdeutlicht die Komplexität der ablaufenden Vorgänge. Dargestellt sind die Verläufe von Schweißstrom und -spannung beim Elektrodenhandschweißen. In Abhängigkeit vom Schweißverfahren und von den jeweiligen Parametern existieren für jeden dieser Zustände optimale statische und dynamische Bedingungen, denen die Stromquelle gerecht werden muß. So wird beispielsweise für einen stabilen Prozeßablauf eine bestimmte Form der stationären Belastungskennlinie gefordert. Für das WIG-Schweißen mit nichtabschmelzender Wolframelektrode unter Schutzgas und für das Elektrodenhandschweißen mit umhüllter, abschmelzender Elektrode ist eine Konstantstromcharakteristik im Bereich der Bogenbrennspannung erforderlich. Dabei soll der Schweißstrom in möglichst weiten Grenzen stufenlos einstellbar sein (zum Beispiel 22 V/50 A bis 36 V/400 A). Die Höhe der maximalen Schweißspannung bestimmt die Elastizität des Lichtbogens, d. h. seine mögliche Längenänderung. Leerlaufspannung und Stromanstiegsgeschwindigkeit bei Erstzündung sind für die Zündeigenschaften der Stromquelle verantwortlich. Für das Schutzgasschweißen mit abschmelzender Drahtelektrode (MIG/MAG-Schweißen) benötigt man im Bereich der Bogenbrennspannung eine Konstantspannungs-Charakteristik bzw. eine flach fallende Charakteristik im Bereich großer Ströme. Bei kleinen Strömen (unter 20 A) sollte die Kennlinie stärker geneigt sein, um auch hier die Prozeßstabilität zu sichern [2]. Während sich die Anforderungen an die stationären Stromquelleneigenschaften relativ genau formulieren lassen, sind die dynamischen Eigenschaften und ihr Einfluß auf die einzelnen Prozeßphasen beim Lichtbogenschweißen noch nicht vollständig bekannt [3]. So ist zum Beispiel der Einfluß des Stromverlaufs während eines Tropfkurzschlusses auf den Mechanismus der möglichst spritzerfreien Tropfenablösung Gegenstand grundlegender Untersuchungen. Hier bietet der Schweißumrichter als dynamisch hochwertiges Stellglied neue Möglichkeiten auch für die weitere Analyse des Lichtbogenschweißprozesses.

Das stationäre Betriebsverhalten von Thyristorschweißumrichtern wird durch die Steuerung der Wechselrichterventile, die Eigenschaften des Mittelfrequenztransformators sowie durch die übrigen Schwingkreisparameter bestimmt. Für eine optimale statische Anpassung ist zunächst die Kenntnis des Belastungskennlinienfeldes einschließlich seiner Begrenzungen ein entscheidendes Kriterium. Die dynamische Anpassung erfolgt durch eine entsprechende Sollwertführung innerhalb dieses Kennlinienfeldes.

Bild 1. Prozeßphasen beim Elektrodenhandschweißen
Stromquelle: Thyristorschweißumrichter, $\bar{I}_S$ = 150 A
Elektrode: Anker E43 2R12; 3,25 mm Dmr.
1 Lichtbogenzünden
2 Tropfenkurzschluß
3 Lichtbogenwiederzündung
4 Lichtbogenverlängerung
5 Lichtbogenabriß
6 Leerlauf



3. Stationäres Betriebsverhalten

Bevorzugte Wechselrichterschaltung für Thyristorschweißumrichter ist der Reihenschwingkreiswechselrichter in Halbbrückenschaltung mit Gegendioden. Im relevanten Leistungsbereich bis 20 kW (entsprechend 500 A Schweißstrom) zeichnet sich diese Schaltung bei geringem Bauelementeaufwand durch

- — eine nahezu lastunabhängige Spannungsbelastung der Ventile
- — die Möglichkeit der Energieauskopplung über einen Transformator, auch mit nachgeschaltetem Gleichrichter
- — Kurzschluß- und Leerlauffestigkeit
- — eine gute Steuerbarkeit der Ausgangsparameter über Wechselrichterfrequenz und Zündverzögerungszeit

aus.

In Erweiterung der bekannten theoretischen Grundlagen von Schwingkreiswechselrichtern [4] war es für die Entwicklung von Schweißumrichtern erforderlich, Aussagen

- — über Form und Beeinflußbarkeit der Belastungskennlinien
- — zur Abhängigkeit des Stellbereichs von der Schwingkreisdimensionierung
- — zum Zusammenhang zwischen Wechselrichtersteuerfrequenz f_s und Zündverzögerungszeit t_v
- — zur Dimensionierung des Mittelfrequenztransformators und
- — zum Einfluß eines nachgeschalteten Gleichrichters und Glättungseinrichtungen

zu gewinnen.

Grundlage der Berechnung des stationären Betriebsverhaltens ist die im Bild 2 dargestellte Ersatzschaltung [5]. Es wird von der Annahme idealer Ventile, konstanter Zwischenkreisspannung und linearer Bauelementeparameter ausgegangen. Der Mittelfrequenztransformator ist durch Magnetisierungsinduktivität L_μ, Streuinduktivität L_σ und Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}$ beschrieben. Als Last wird im einfachsten Fall ein Widerstand R angenommen, der direkt oder über einen idealen Gleichrichter an den Mittelfrequenztransformator angeschlossen ist. In der Regel liegt das Induktivitätsverhältnis $k_L = L_\sigma'/L_\mu$ in der Größenordnung um 0,1. Unter dieser Bedingung ist die zusätzliche Blindstrombelastung der Ventile gering. Darüber hinaus ist für alle R die relative Dämpfung D_0 stets kleiner als eins. Damit wird für alle Lastfälle der für eine ordnungsgemäße Steuerung erforderliche Schwingfall stets garantiert. Für den im Bild 2 dargestellten Lastfall kann dann bei vernachlässigbarem Magnetisierungsstrom i_μ eine geschlossene Lösung für die Belastungskennlinie $\overline{I}_d = f(\overline{U}_d)$ angegeben werden. Aus der Lösung der Differentialgleichung ergibt sich mit den Bedingungen für die Stetigkeit von i_1 und u_c sowie für die Stationarität:

$$\overline{I}_d = \frac{2}{\pi} CE\ddot{u}\,\omega_s \left[1 + K\sqrt{1-D_0^2}\exp\left(-\frac{D_0\,\pi}{\sqrt{1-D_0^2}}\right)\right], \qquad (1)$$

$$\overline{U}_d = R\,\overline{I}_d.$$

Im lückenden Betrieb (Bild 3a) ist die Konstante K unabhängig von Steuerfrequenz und Zündverzögerungszeit. Für $\alpha \geqq \pi$ gilt:

$$K = \frac{2\exp\dfrac{2\,D_0\,\pi}{\sqrt{1-D_0^2}}}{\sqrt{1-D_0^2}\left[1+\exp\left(\dfrac{2\,D_0\,\pi}{\sqrt{1-D_0^2}}\right)\right]}.$$

Bei nichtlückendem Betrieb (Bild 3b) nimmt K mit wachsender Steuerfrequenz bzw. abnehmender Zündverzögerungszeit zu.

Für $\alpha < \pi$ gilt:

$$K = -\frac{2\exp\left[\dfrac{(\pi+\alpha)\,D_0}{\sqrt{1-D_0^2}}\right]}{\sqrt{1-D_0^2}\left[\cos\alpha + \dfrac{D_0}{\sqrt{1-D_0^2}}\sin\alpha + \left(\cos\gamma + \dfrac{D_0}{\sqrt{1-D_0^2}}\sin\gamma\right)\exp\left(D_0\,\pi\,\omega_0/\omega_s\right)\right]} \qquad (4)$$

mit

Zündverzögerungswinkel

$$\alpha = \sqrt{1-D_0^2}\,\omega_0\,t_v, \qquad (5)$$

Thyristorleitdauer

$$\gamma = \sqrt{1-D_0^2}\,(\omega_0\,t_v - \pi\,\omega_0/\omega_s). \qquad (6)$$

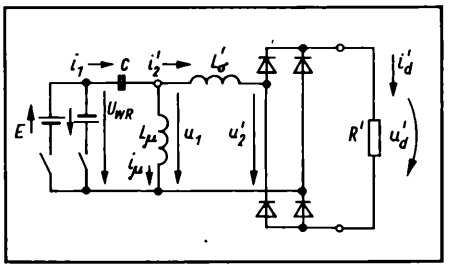


Bild 2. Ersatzschaltung Schwingkreiswechselrichter — Transformator — Gleichrichter — Wirklast

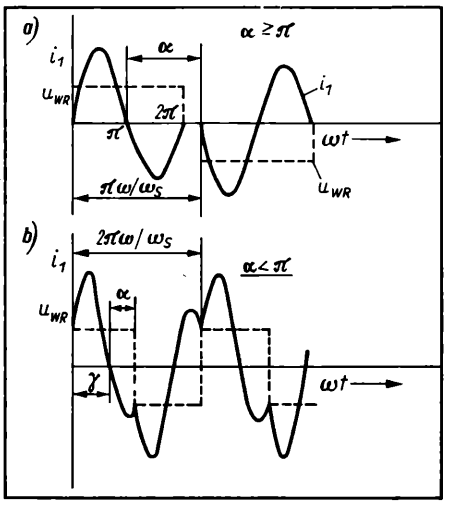


Bild 3. Charakteristische Verläufe des Wechselrichterstromes bei lückendem (a) und nichtlückendem (b) Betrieb

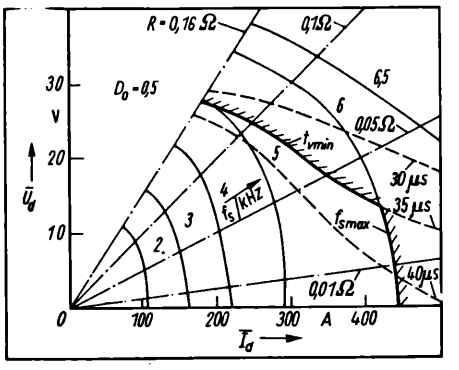


Bild 4. Stationäres Belastungskennlinienfeld $E = 250$ V, $C = 6$ µF, $L = 3$ µH, $\ddot{u} = 4{,}5$

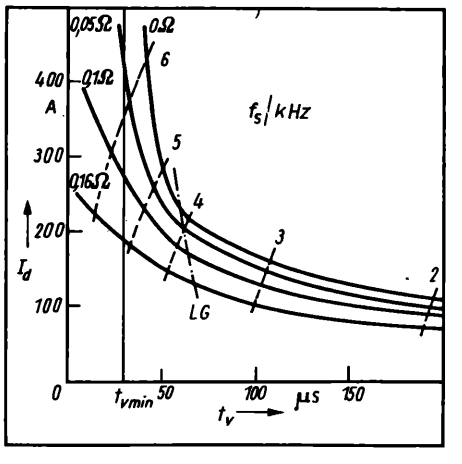


Bild 5. Typische Steuerkennlinien mit dem Lastwiderstand als Parameter *LG* Lückgrenze

Zwischen der Steuerfrequenz f_s und der Zündverzögerungszeit t_v besteht der Zusammenhang:

$$t_v = \frac{1}{\omega_0\sqrt{1-D_0^2}} \arctan\frac{\sin\sqrt{1-D_0^2}\,\pi\,\omega_0/\omega_s}{\cos\sqrt{1-D_0^2}\,\pi\,\dfrac{\omega_0}{\omega_s} + \exp\left(-D_0\,\pi\,\omega_0/\omega_s\right)}. \qquad (7)$$

Mit den Normierungsgrößen $\omega_0^2 = 1/LC$ und $D_0 = 0{,}5\,R\sqrt{C/L}$ beschreiben die Gln. (1) bis (7) in allgemeingültiger Form das stationäre Betriebsverhalten von Reihenschwingkreiswechselrichter — Mittelfrequenztransformator — Wirklast bei vernachlässigbarem Magnetisierungsstrom. Die numerische Auswertung ergibt stationäre Belastungskennlinien, wie sie im Bild 4 für einen konkreten Fall dargestellt sind. Der Verlauf der natürlichen, d.h. ungeregelten Kennlinien hängt wesentlich vom Steuerprinzip ab. Bei konstanter Steuerfrequenz erhält man eine steil fallende Charakteristik. Bei konstanter Zündverzögerungszeit verlaufen die Kennlinien flacher, insbesondere bei sehr kleinen Zündverzögerungszeiten und großer Resonanzannäherung. Das Kennlinienfeld wird durch die maximale Steuerfrequenz $f_{s\,max}$ begrenzt, die von der Freiwerdezeit der Thyristoren abhängige minimale Zündverzögerungszeit $t_{v\,min}$ und bei großem L_μ durch die maximal zulässige Schwingkreisdämpfung oder durch die Gültigkeitsgrenze der getroffenen Annahme vernachlässigbar geringen Magnetisierungsstromes.

Die Steuercharakteristik des Thyristorwechselrichters, im Bild 5 als Abhängigkeit des Ausgangsstromes von der Zündverzögerungszeit mit dem Lastwiderstand R als Parameter dargestellt, ist insbesondere im Bereich nichtlückenden Wechselrichterstromes und kleiner Dämpfung nichtlinear. Die Freiwerdezeit der Thyristoren bestimmt $t_{v\,min}$ und damit die obere Grenze des Stellbereichs. Bei lückendem Wechselrichterstrom ändert sich der mittlere Ausgangsstrom nur wenig. Berücksichtigt man den steigenden Aufwand an gleichstromseitigen Glättungsmitteln bei zunehmender Lückdauer, so kann die Lückgrenze als untere Begrenzung des Stellbereichs angesehen werden. Er ist umso größer, je stärker die Resonanzüberhöhung ausgenutzt werden kann. Bei gegebenen Thyristoreigenschaften ist das nur durch eine Verringerung der Schwingkreisfrequenz möglich. Damit muß bei der praktischen Dimensionierung ein Kompromiß zwischen möglichst großem Stellbereich und möglichst hoher Wechselrichterfrequenz eingegangen werden.

Mit dem angegebenen Modell ist es möglich, die Dimensionierung des Schwingkreises bei gegebenem, maximalen Arbeitspunkt mit ausreichender Genauigkeit vorzunehmen. Bild 6 zeigt den Zusammenhang zwischen Schwingkreiskapazität, Übersetzungsverhältnis des Mittelfrequenztransformators, Wechselrichterfrequenz und minimaler Zündverzögerungszeit für einen Arbeitspunkt von 250 A/30 V. Die Wahl des Übersetzungsverhältnisses wird durch die Höhe der Leerlaufspannung und den zulässigen Wechselrichterstrom bestimmt.

Schweißumrichter mit Reihenschwingkreiswechselrichter bieten die Möglichkeit, die Leerlaufspannung in einem weiten Bereich zu steuern. Durch Verringerung der Zündverzögerungszeit bzw. durch Erhöhung der Steuerfrequenz kann die Resonanzüberhöhung in dem aus C und L_μ bestehenden Schwingkreis ausgenutzt werden. Auf diese Weise lassen sich kurzzeitig hohe Leerlaufspannungen zur Verbesserung des Zündverhaltens erzeugen.

Ist außer den Elementen C, R, L auch der Einfluß der Magnetisierungsinduktivität L_μ, der Kommutierungsinduktivität L_k oder eines Verlustwiderstandes R_v zu berücksichtigen, so kann die Lösung des Differentialgleichungssystems nicht mehr analytisch geschlossen angegeben werden. Hier empfiehlt sich die Anwendung der Methode der Überlagerung harmonischer Komponenten oder bei geringeren Anforderungen an die Genauigkeit auch die Grundwellenmethode. Dazu wird die rechteckförmige Wechselrichterspannung in die Summe ihrer harmonischen Komponenten zerlegt:

$$u_{WR}(t) = \frac{4E}{\pi}\left[\sum_{\nu=0}^{\infty}\frac{1}{1\nu+1}\sin(2\nu+1)\,\omega_s t\right]. \qquad (8)$$

Als Ergebnis der Netzwerkberechnung erhält man die gesuchten Größen als Effektivwert. Die Zündverzögerungszeit ergibt sich näherungsweise aus der Verschiebung der Grundwellen von Wechselrichterstrom i_{11} und -spannung u_{WR1}. Bild 7 zeigt einige auf der Grundlage dieses Modells berechnete Abhängigkeiten der stationären Belastungskennlinien von C, L_μ und L_σ.

Das stationäre Betriebsverhalten von Reihenschwingkreiswechselrichtern mit Mittelfrequenztransformator, Gleichrichter und Gegenspannungslast, Gegenspannungslast und linearer Glättungsinduktivität sowie Konstantstromlast läßt sich für spezielle Fälle (keine Dämpfung, nur L_μ oder L_σ berücksichtigt) ebenfalls durch analytisch geschlossene Lösungen beschreiben [5] [6].

Auf dieser Grundlage wurden spezielle Effekte, zum Beispiel der von der Sinusform abweichende Verlauf des Wechselrichterstromes und der Einfluß der Glättungsdrossel auf die stationären Belastungskennlinien näher untersucht.

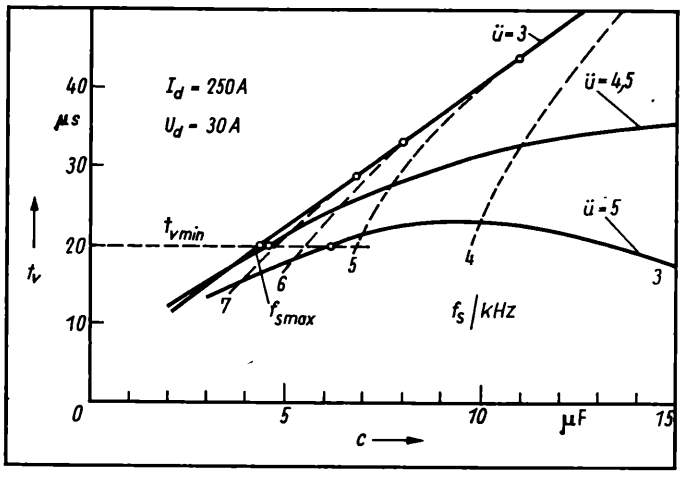


Bild 6. Zum Zusammenhang zwischen Übersetzungsverhältnis, Schwingkreisparameter, Wechselrichterfrequenz und Zündverzögerungszeit (L_σ = 3 µH)

4. Energetische Parameter von Schweißumrichtern

Schweißumrichter sind nicht nur wesentlich kleiner und leichter als konventionelle Stromquellen, sie haben auch einen höheren Wirkungsgrad und kommen mit einer geringeren Anschlußleistung aus (Bild 8). Die Differenz der Verlustleistungen eines konventionellen, thyristorgesteuerten Gleichrichters und eines Thyristorschweißumrichters ist vom Arbeitspunkt abhängig. Im Beispiel beträgt die Einsparung über den gesamten Einstellbereich mindestens 1 kW, im Bereich von 100 bis 300 A über 2 kW. Die Anschlußleistung des

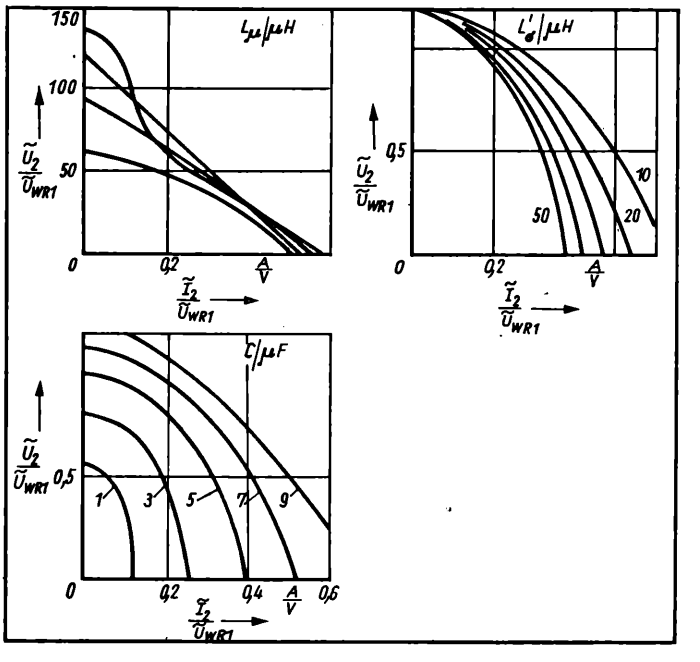
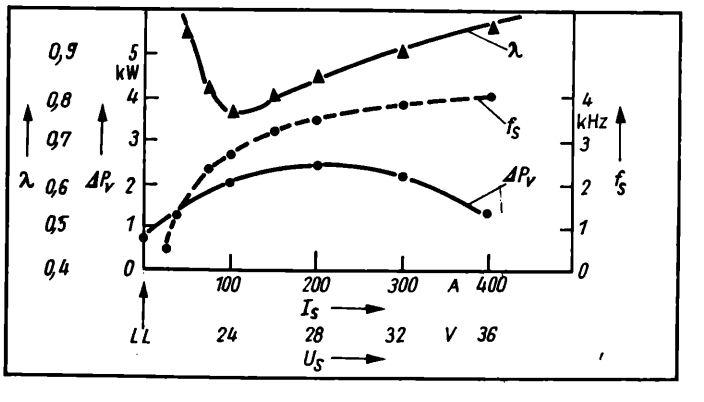


Bild 7. Einfluß der Schwingkreisparameter auf die stationären Belastungskennlinien

Bild 8. Verlustleistungsdifferenz, Leistungsfaktor und Wechselrichterfrequenz in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt



Umrichters ist über den gesamten Bereich um durchschnittlich 4 kVA geringer. Hier wirkt sich das blindleistungssparende Schaltungsprinzip des Umrichters mit ungesteuertem Eingangsgleichrichter positiv aus. Während Energieverluste bei konventionellen Stromquellen hauptsächlich im Stromrichtertransformator auftreten, sind bei Thyristorschweißumrichtern die verlustbehafteten Beschaltungen der Ventile entscheidend. Der Absolutwert der Verlustleistung ist bei Umrichtern gegenwärtig noch so hoch, daß je dm^3 Gerätevolumen etwa 18 W in Wärme umgewandelt werden im Gegensatz zu nur etwa 5 W bei konventionellen Geräten. Durch dynamisch hochwertigere Thyristoren in Verbindung mit zweckmäßigeren Beschaltungen dürfte bei Schweißumrichtern perspektivisch eine geringere Verlustleistungsdichte möglich werden.

5. Zusammenfassung

Die Anwendung des Umrichterprinzips führte zu einer neuen Generation von Stromquellen für das Lichtbogenschweißen. Masse, Volumen-, Anschluß- und Verlustleistung dieser Schweißumrichter sind erheblich geringer als bei konventionellen Schweißstromquellen. Die Anpassung der Umrichterstromquelle an den Schweißprozeß erfolgt durch geeignete Dimensionierung und Steuerung des Wechselrichters. Hierzu ist die Kenntnis des stationären Betriebsverhaltens von besonderer Bedeutung. Für den überwiegend angewandten Reihenschwingkreiswechselrichter wird ein für die ingenieurmäßige Dimensionierung geeignetes Modell vorgestellt. Für ausgewählte Parameterkombinationen werden Belastungskennlinienfelder, Steuercharakteristik und Dimensionierungsrichtlinien angegeben. Die mögliche Elektroenergieeinsparung wird durch Meßergebnisse dokumentiert. Umrichter wurden bisher vor allem dort eingesetzt, wo es auf die technologische Wirkung der Mittelfrequenz ankam. Mit der fortschreitenden Entwicklung der Leistungselektronik ist es möglich, Umrichter auch als Stromquelle für andere elektrotechnologische Verfahren einzusetzen. Die Substitution des Netztransformators konventioneller Stromversorgungsanlagen durch einen viel kleineren, mit höherer Frequenz betriebenen Transformator führt zu einer bedeutenden Material- und Energieeinsparung. Gleichzeitig eröffnet das netzfrequenzunabhängige Stellprinzip vielfältige Möglichkeiten der Beeinflussung des technologischen Prozesses. Für das Lichtbogenschweißen ist mit der Produktionseinführung von Schweißumrichtern in der DDR ein erster Schritt in diese Richtung getan worden.

Verwendete Formelzeichen und Indizes

C	Schwingkreiskapazität
D_0	relative Dämpfung
E	Zwischenkreisspannung
f_s	Steuerfrequenz
i	Strom
K	Faktor
k_L	Induktivitätsverhältnis
L_σ	Streuinduktivität
L_μ	Magnetisierungsinduktivität
P_V	Verlustleistung
R	Lastwiderstand
t_V	Zündverzögerungszeit
u	Spannung
$\ddot{u}$	Übersetzungsverhältnis
α	Zündverzögerungswinkel
γ	Thyristorleitwinkel
λ	Leistungsfaktor
ω	Kreisfrequenz des gedämpften Schwingkreises
ω_0	Kreisfrequenz des ungedämpften Schwingkreises
1	Primär-
2	Sekundär-
d	Gleichstrom-, Gleichspannung-
WR	Wechselrichter-
WR1	Grundwelle des Wechselrichters-
s	Schweiß-, Steuer-
	auf Primärseite bezogen

Literatur

[1] *Mecke, H.; Knapp, W.:* Stand und Perspektiven elektronischer Stromquellen für das Lichtbogenschweißen. Schweißtechnik, Berlin 34 (1984) 8, S. 338–342

[2] *Krampitz, R.; Mecke, H.:* Elektronische Stromquellen in der Elektrotechnologie. ELEKTRIE, Berlin 41 (1987) 4, S. 135–137

[3] *Rehfeldt, D.:* Schweißprozeßanalyse und -überwachung bei Lichtbogenschweißprozessen. Vortrag auf der Schweißtechnischen Tagung, Magdeburg 1987

[4] *Conrad, H.:* Beitrag zur Mittelfrequenzerzeugung für Induktionserwärmung. Diss. A, TU Dresden, 1966

[5] *Fischer, W.:* Betriebsverhalten und Steuerung von Schweißumrichtern. Diss. A, TH Magdeburg, 1985

[6] *Blumschein, E.:* Beiträge zur Schaltungslehre der Gleichrichter mit intern erhöhter Frequenz. ELEKTRIE, Berlin, 41 (1987) 4, S. 137–140

EA 5879

Simulation von Stromrichter-Maschinen-Systemen

R. Schönfeld; T. Eulitz, KDT; Dresden

Die Simulation von Stromrichter-Maschinen-Systemen erfordert die Systembeschreibung in einem einheitlichen Koordinatensystem. Brauchbar sind raumfeste (ständerorientierte) und synchron mit dem Wechselrichterausgangssignal umlaufende (feldorientierte) Koordinatensysteme. Die Konsequenzen, die sich daraus für die Simulation von Drehstrom- und Gleichstromantrieben auf Arbeitsplatzrechnern ergeben, werden dargestelllt.

1. Zustandsvektor des Stromrichters und des Motors

Die Ausgangsspannungen der Stränge a, b, c eines Wechselrichters können, elektrische Symmetrie vorausgesetzt, zu einem Vektor

$$\underline{u}_s = \frac{2}{3}\left(u_{sa} + u_{sb}\, e^{j\,120°} + u_{sc}\, e^{j\,240°}\right) \tag{1}$$

zusammengefaßt werden. Der Vektor läuft bei sinusförmiger Ausgangsspannung mit Grundfrequenz f_s mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega_s = 2\pi f_s$ um

$$\underline{u}_s = |U_s|\, e^{j(\omega_s t + \varphi_s)}. \tag{2}$$

Er umfaßt bei sinusförmiger, periodischer Ausgangsspannung außer dem Grundanteil eine Summe von Oberschwingungsanteilen

$$\underline{u}_s = |U_{s1}|\, e^{j(\omega_s t + \varphi_s)} + \sum_{\nu=2}^{\infty} |U_{s\nu}|\, e^{j(\nu\omega_s t + \varphi_{s\nu})}. \tag{3}$$

Im Grenzfall rechteckförmiger Ausgangsspannungen (π-Einschaltung) durchläuft $\underline{u}_s$ ein symmetrisches Sechseck. Der Vektor springt mit der Taktfrequenz $\sigma \cdot f_s$ vom Zustand q_1 in den Zustand q_2 usw. (Bild 1).

Der Ausgangsvektor des Wechselrichters entspricht dem Eingangsvektor des Motors, die Zustandsgleichungen der Drehfeldmaschine ermöglichen die Berechnung der Ströme und Flußverkettungen

$$\underline{u}_s = \underline{i}_s R_s + \frac{d\underline{\psi}_s}{dt}, \tag{4}$$

$$\underline{u}_r = \underline{i}_r R_r + \frac{d\underline{\psi}_r}{dt} + j\,\omega\,\underline{\psi}_r, \tag{5}$$

$$m = \frac{3}{2} z_p \left(\psi_{sx} \cdot i_{s\beta} - \psi_{s\beta} \cdot i_{sx}\right), \tag{6}$$

$$= \frac{3}{2} z_p \left(\psi_{r\beta} \cdot i_{r\alpha} - \psi_{r\alpha} - i_{r\beta}\right).$$

Die Vektoren des Wechselrichters und des Motors können in einem beliebigen Koordinatensystem angegeben werden, das Koordinatensystem ist aber für Wechselrichter und Motor einheitlich festzulegen. Den Gln. (1) bis (6) liegt ein raumfestes, in bezug auf die Maschine ständerorientiertes Koordinatensystem zugrunde. Es ist ferner möglich, ein mit dem Grundanteil der Wechselrichterausgangsspannung synchron umlaufendes Koordinatensystem anzuwenden. Der Vektor der Grundschwingung der Wechselrichterausgangsspannung steht in diesem Koordinatensystem still. Der oberschwingungsbehaftete Spannungsvektor realisiert Pendelbewegungen um den Vektor der Grundschwingung. Im Grenzfall rechteckförmiger Ausgangsspannung springt der Vektor von $-30°$ auf $+30°$, bezogen auf den Vektor der Grundschwingung und läuft in der Zeit T/6 kontinuierlich auf $-30°$ zurück. Dieses Koordinatensystem wird im folgenden als „Wechselrichterkoordinatensystem" bezeichnet. Es entspricht dem netzsynchron umlaufenden Koordinatensystem, das zur Beschreibung von Motoren, die direkt am Netz arbeiten, angewandt wird. Unter bestimmten Voraussetzungen entspricht das auch dem feldorientierten Koordinatensystem des Motors.

Prof. Dr.-Ing. habil. *Rolf Schönfeld* ist Leiter des Wissenschaftsbereichs Elektrische Automatisierungstechnik der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden, Dipl.-Ing. *Thomas Eulitz* ist Forschungsstudent am gleichen Bereich.

Der Beitrag entstand auf der Grundlage gemeinsamer Forschungsarbeiten mit dem VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin.

2. Simulation von Drehstromantrieben im raumfesten Koordinatensystem

Im raumfesten Koordinatensystem entsprechen die Zeitverläufe der Spannungen und Ströme der physikalischen Realität. Sie können dreiphasig in den Komponenten a, b, c oder in orthogonalen Komponenten α und $j\beta$ dargestellt werden. Es gilt zur Umrechnung aus (1)

$$\underline{u}_s = u_{s\alpha} + j\, u_{s\beta} = \frac{2}{3}\left(u_{sa} - \frac{1}{2}u_{sb} - \frac{1}{2}u_{sc}\right) + j\,\frac{2}{3}\left(\frac{1}{2}\sqrt{3}\,u_{sb} - \frac{1}{2}\sqrt{3}\,u_{sc}\right).$$

Den Signalflußplan der Asynchronmaschine zeigt Bild 2. Den Kern bilden die Zustandsgleichungen der Flußkomponenten des Ständers und des Läufers. Die Ströme und das elektrische Moment lassen sich, auch bei auftretenden Oberschwingungen, mathematisch exakt daraus ableiten. Die Vorgänge in der Maschine bleiben jedoch unanschaulich. Als Simulationsergebnis zeigt Bild 3 Motorstrom und Motormoment bei Speisung des Motors aus einem Wechselrichter mit π-Einschaltung. Im Momentenverlauf ist die 6fache Grundfrequenz deutlich erkennbar, im Strom tritt bei 5. und 7. Oberschwingung auf. Bild 3 c) zeigt, daß für $t > 0{,}32$ s, d.h. nach Abklingen eines numerischen Einschwingvorgangs, der Betrag der Rotorflußverkettung praktisch konstant ist.

3. Simulation von Drehstromantrieben im Wechselrichterkoordinatensystem

Im Wechselrichterkoordinatensystem wird eine wesentlich vereinfachte Darstellung des Wechselrichters möglich. Bei sinusförmiger Ausgangsspannung wird $\underline{u}_s$ zu einer skalaren Größe, die vorteilhaft in Richtung der reellen Achse gelegt wird:

$$\underline{u}_s = u_{sd};\ u_{sq} = 0. \qquad (8)$$

Bei nichtsinusförmiger Ausgangsspannung ist der Wechselrichter als Automat darzustellen, der unter Berücksichtigung der speziellen Spannungskurvenform eine Umschaltung des Vektors in einem Sektor von $\pm 30°$ um die reelle Achse bewirkt (Bild 1f). Im Unterschied zur Darstellung im raumfesten Koordinatensystem wird nur

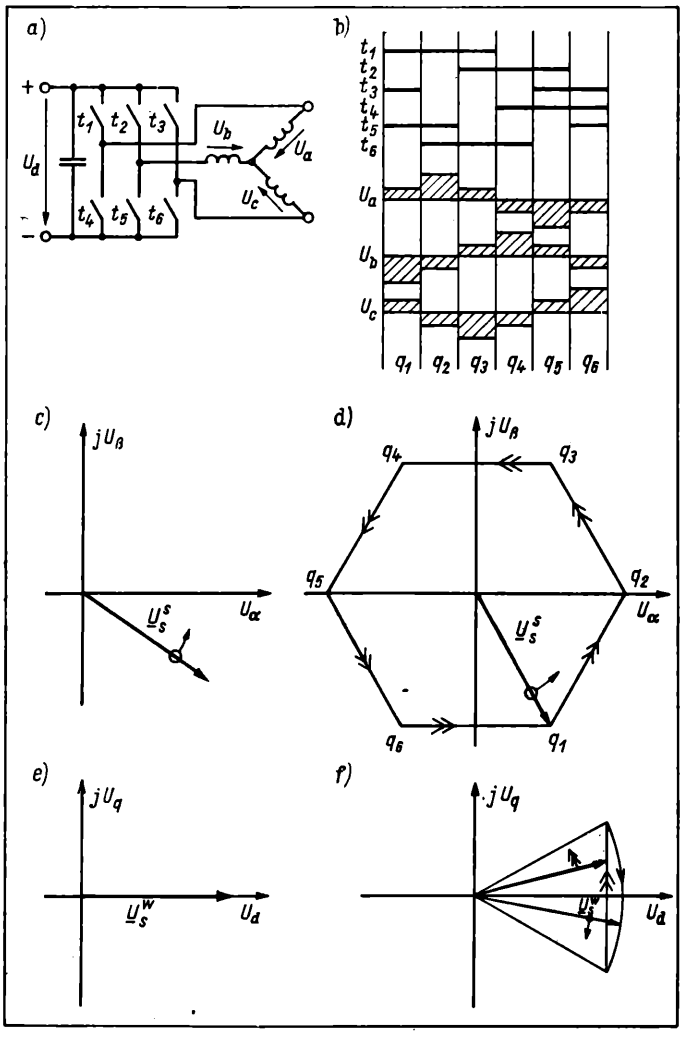


Bild 1. Zustandsvektor des spannungseinprägenden Wechselrichters
a) Prinzipschaltung des Wechselrichters
b) Zeitverlauf der Ausgangsspannung des Wechselrichters bei π-Einschaltung (Strangspannung, bezogen auf einen freien Spannungsmittelpunkt)
c) d) Vektor der Strangspannung in einem raumfesten Koordinatensystem
e) f) Vektor der Strangspannung in einem Wechselrichterkoordinatensystem
c) e) Einprägen sinusförmiger Spannungen
d) f) Einprägen rechteckförmiger Spannungen
—→— Ortskurvenabschnitt, der vom Vektor mit der Winkelgeschwindigkeit ω_s durchlaufen wird
—→→— Ortskurvenabschnitt, der vom Vektor sprunghaft durchlaufen wird

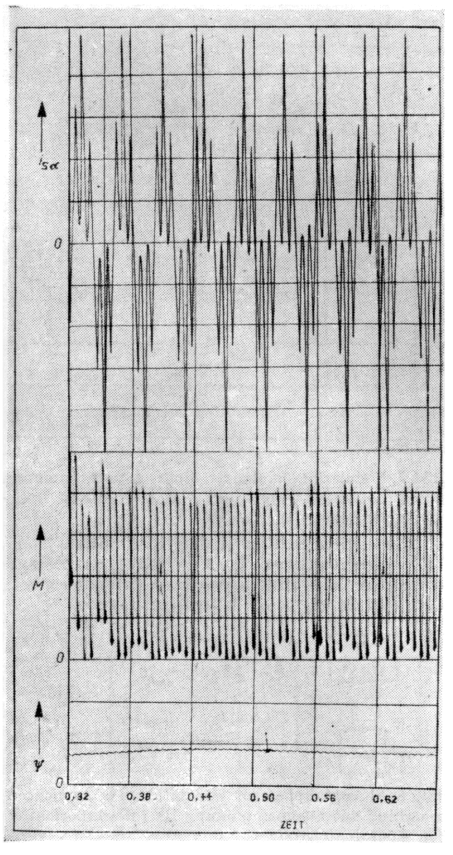


Bild 3. Simulationsergebnisse eines Asynchronmotors, gespeist aus einem Spannungswechselrichter mit π-Einschaltung im raumfesten Koordinatensystem (quasistationärer Vorgang für $t > 0{,}3$ s; numerisches Einschwingen für $t < 0{,}3$ s)
a) Zeitverlauf des Motorstromes, b) Zeitverlauf des Motormomentes, c) Zeitverlauf des Betrags der Rotorflußverkettung

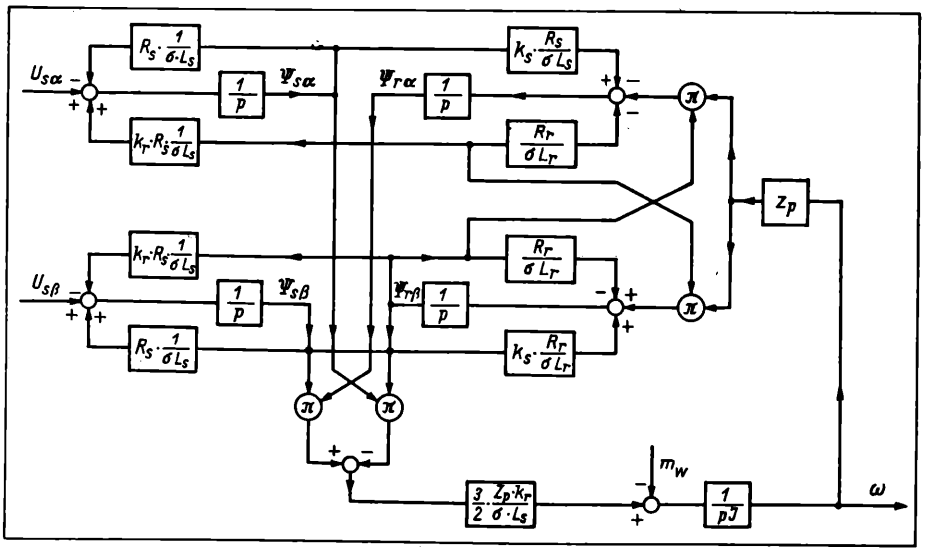


Bild 2. Signalflußplan der Asynchronmaschine im raumfesten Koordinatensystem in orthogonalen Komponenten

$\sigma = \left(1 - \frac{L_{m^s}}{L_s \cdot L_r}\right)$ = Streukoeffizient

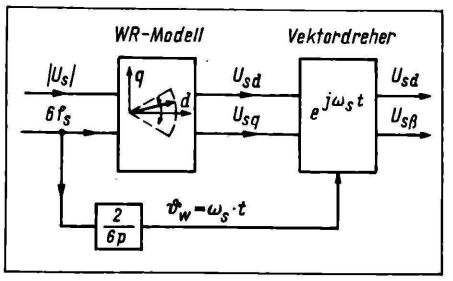


Bild 4. Simulation des Wechselrichters in einem Wechselrichterkoordinatensystem mit nachgeschaltetem Vektordreher

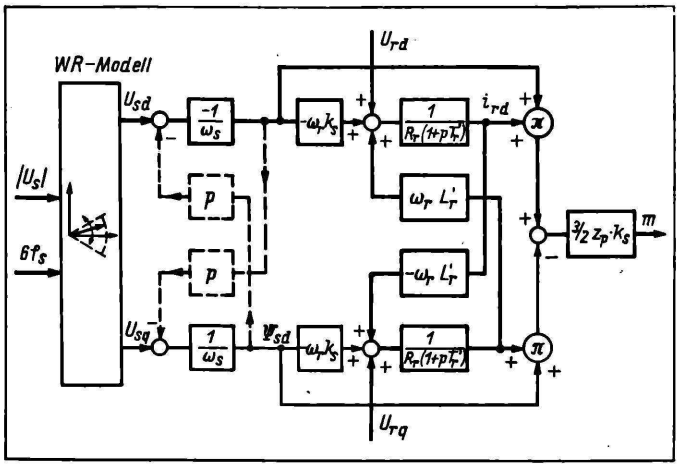


Bild 5. Signalflußplan zur Simulation der Asynchronmaschine im ständerflußorientierten Koordinatensystem für $R_s = 0$, und $\omega_r \approx$ konst.
(Kann die Ständerflußverkettung als annähernd konstant angesehen werden, $\frac{d\psi_s}{dt} = 0$, entfallen die gestrichelt gezeichneten Glieder, ist die Ständerspannung frei von Oberschwingungen, $u_{sq} = 0$, entfallen die dünn gezeichneten Glieder)

1/6 der Periode der Ausgangsspannung simuliert. Dem Wechselrichter ist ein allgemeiner Vektordreher der Übertragungsfunktion

$$\underline{u}_s^s = \underline{u}_s^w \cdot e^{j\omega st}. \tag{9}$$

$\underline{u}_s^w$ Vektor der Wechselrichterausgangsspannung im Wechselrichterkoordinatensystem,

$\underline{u}_s^s$ Vektor der Wechselrichterausgangsspannung im raumfesten Koordinatensystem,

nachzuschalten, wenn die Drehfeldmaschine weiterhin im raumfesten Ständerkoordinatensystem simuliert wird (Bild 4).
Vorteilhaft ist es, den Motor im feldorientierten Koordinatensystem zu simulieren. In zwei charakteristischen Fällen ist das sinnvoll möglich:

a) Drehfeldmaschinen mit konstanter Ständerflußverkettung der Grundschwingung ($R_s \approx 0$; Betrieb am Netz konstanter Spannung bzw. mit $|u_s| = kf_s$) sind einfach in einem auf die Ständerflußverkettung $\underline{\psi}_s$ orientierten Koordinatensystem zu beschreiben, das dem Wechselrichterkoordinatensystem entspricht. Aus den Spannungsgleichungen

$$\underline{u}_s^{\varphi} = \frac{d\underline{\psi}_s}{dt} + j\,\omega_s\,\underline{\psi}_s, \tag{10}$$

$$u_r^{\varphi} = i_r^{\varphi} R_r + \frac{d\underline{\psi}_r}{dt} + j\,\omega_r\,\underline{\psi}_r^{\varphi} \tag{11}$$

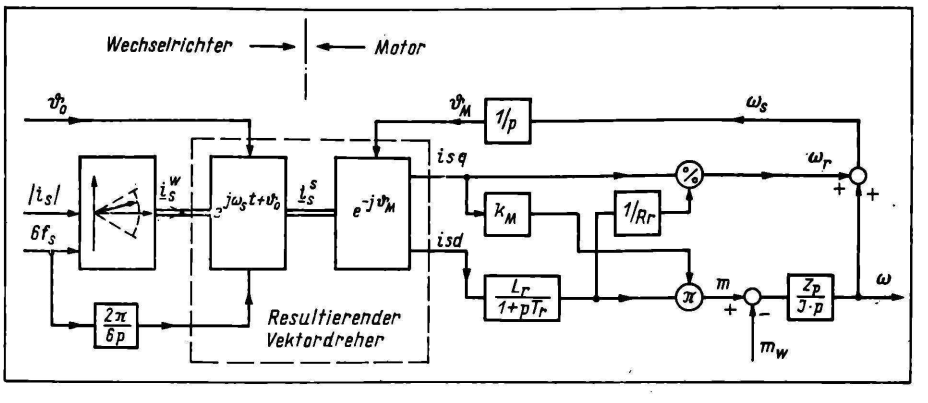


Bild 6. Signalflußplan zur Simulation der Asynchronmaschine mit Stromeinprägung im rotorflußorientierten Koordinatensystem

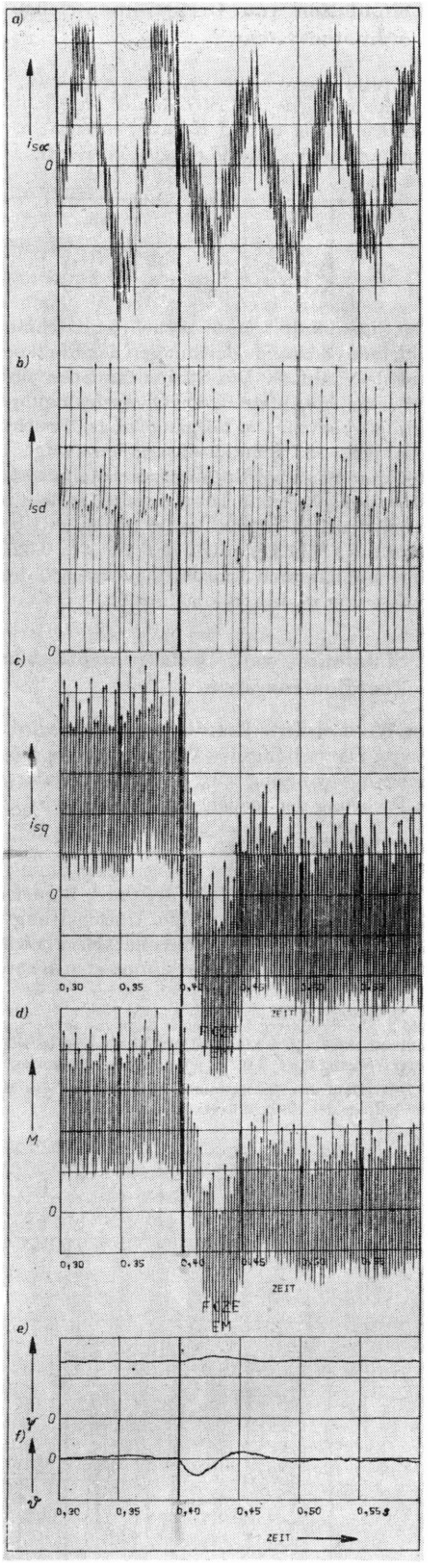


Bild 7. Simulationsergebnisse eines Asynchronmotors mit Ständerstromeinprägung; Änderung des Drehmomentsollwertes zur Zeit $t = 0{,}4$ s
a) Ständerstrom im raumfesten Koordinatensystem, b) Ständerstromkomponenten i_{sd} und i_{sq} im rotorflußorientierten Koordinatensystem, d) Motormoment, e) Rotorflußverkettung, f) Verdrehungswinkel ϑ

und der Flußverkettungsgleichung

$$\underline{\psi}_r = k_s \underline{\psi}_s + \underline{i}_r L_r'; \; L_r' = L_r \left(1 - \frac{L_m^2}{L_r \cdot L_s}\right) = L_r \sigma \tag{12}$$

ergibt sich für

$$u_s^{\varphi} = u_s^{w}; \; \underline{u}_{s1} = u_{s1d}; \; u_{s1q} = 0, \tag{13}$$

d.h. für die Grundschwingung der Ständerspannung in Richtung der d-Achse, der im Bild 5 dargestellte Signalflußplan. Er gilt auch für die Untersuchung von Oberschwingungsproblemen und zur Simulation von Systemen mit $\underline{u}_r \neq 0$ (Kaskadenschaltungen). Kann $\frac{d\psi_s}{dt}$ annähernd mit Null angenommen werden, vereinfacht sich der Signalflußplan. Weitere Vereinfachungen ergeben sich, wenn keine Oberschwingungen in der Ständerspannung auftreten, d.h. für $u_{sq} = 0$. Da der Ausgangsvektor des Wechselrichtermodells mit dem Eingangsvektor des Motors identisch ist, tritt im Simulationsmodell kein Vektordreher auf.

b) Drehfeldmaschinen mit Ständerstromeinprägung (über eine schnelle Stromregelung, auch unter Nutzung stromeinprägender Wechselrichter) werden in einem auf die Rotorflußverkettung orientierten Koordinatensystem beschrieben:

$$\underline{\psi}_r = \psi_{rd}; \; \psi_{rq} = 0.$$

Das ist gegenüber dem Wechselrichterkoordinatensystem des „stromeinprägenden" Wechselrichters um den frequenzunabhängigen, aber im dynamischen Betrieb zeitabhängigen Winkel ϑ verdreht, der sich aus der Phasenlage des einzuprägenden Stromes ($\omega_s t + \vartheta_0$) und dem Verdrehungswinkel des Motors ϑ_M ergibt:

$$\vartheta = (\omega_s t + \vartheta_0 - \vartheta_M). \tag{14}$$

Bild 6 zeigt das Simulationsmodell auf Grund der im rotorfeldorientierten Koordinatensystem gültigen Gleichungen

$$0 = \frac{\psi_{rd}}{L_r} R_r - i_{sd} \frac{L_m}{L_r} R_r + \frac{d\psi_{rd}}{dt}, \tag{15}$$

$$0 = -\mathrm{j}\, i_{sq} \frac{L_m}{L_r} R_r + \mathrm{j}\, \omega_r \psi_{rd}, \tag{16}$$

$$m = \frac{3}{2} k_r z_p \psi_{rd} i_{sq} = m_w + J \frac{d\omega}{z_p \cdot dt}, \tag{17}$$

$$\vartheta_M = \int_t \omega \, dt. \tag{18}$$

ω mechanische Winkelgeschwindigkeit einer Maschine mit Polpaarzahl $z_p = 1$.

Auf der Grundlage dieses Simulationsmodells können Vorgänge mit konstanter bzw. veränderlicher Rotorflußverkettung einschließlich Oberschwingungsproblemen untersucht werden.

Die Rotorflußverkettung ist frei von Oberschwingungsanteilen, da die kurzgeschlossene Rotorwicklung ($\underline{u}_r = 0$) eine schnelle Änderung der Rotorflußverkettung nicht zuläßt.

Im Simulationsmodell berücksichtigt ein resultierender Vektordreher, daß zwischen dem Ständerstromvektor $\underline{i}_s^w$ im Wechselrichterkoordinatensystem und demselben Ständerstromvektor $\underline{i}_s^{\varphi}$ im rotorflußorientierten Koordinatensystem ein zeitabhängiger Verdrehungswinkel ϑ nach (14) besteht.

Bild 7 zeigt den Verlauf

— des Ständerstromes (i_s) im raumfesten Koordinatensystem

Bild 8. Gleichstromantrieb im raumfesten Koordinatensystem
—→— Ortskurvenabschnitt, der vom Vektor mit der Winkelgeschwindigkeit ω_N durchlaufen wird
—→→— Ortskurvenabschnitt, der vom Vektor sprunghaft durchlaufen wird

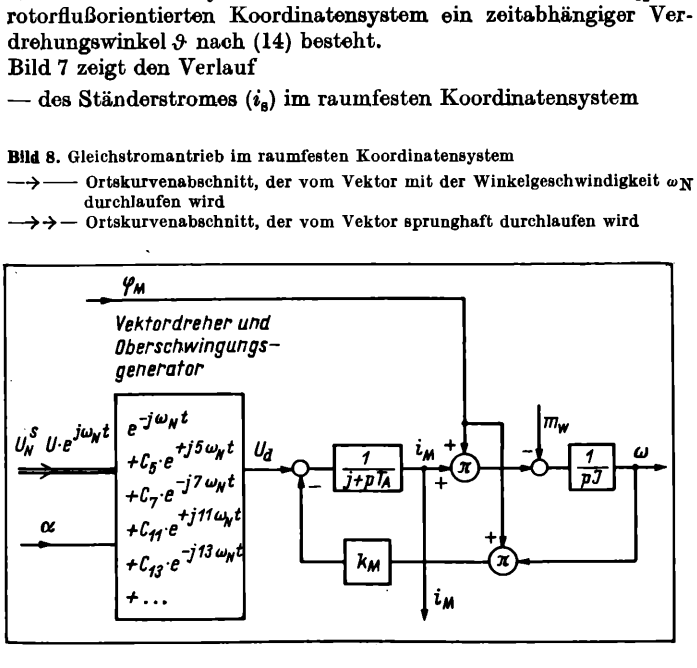
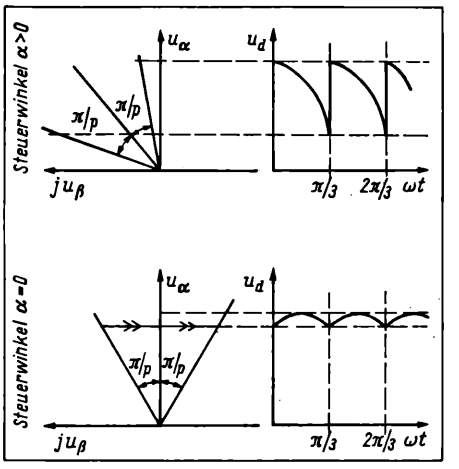


Bild 9. Simulationsmodell des Gleichstromantriebs mit Spannungseinprägung im raumfesten Koordinatensystem



— der Ständerstromkomponenten i_{sd} und i_{sq} im rotorflußorientierten Koordinatensystem
— des Motormomentes
— der Rotorflußverkettung
— des Verdrehungswinkels

bei sprungförmiger Änderung des Drehmomentsollwertes zur Zeit $t = 0{,}4$ s.

Die Simulation des Systems Wechselrichter-Motor im feldorientierten Koordinatensystem ist einfacher und übersichtlicher als im raumfesten Koordinatensystem. Die programmtechnische Realisierung des Vektordrehers mit der notwendigen Genauigkeit ist mit den heute zur Verfügung stehenden rechentechnischen Mitteln zu gewährleisten. Die Simulation des Drehstromantriebs im feldorientierten Koordinatensystem läßt die Analogie zum Gleichstromantrieb deutlich werden.

4. Simulation von Gleichstromantrieben im raumfesten Koordinatensystem

Gleichrichter wandeln den im raumfesten Koordinatensystem mit ω_N umlaufenden Vektor der Netzspannung

$$\underline{U}_N^s = U \cdot e^{j\omega_N t},$$

$$U = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{ph\,eff},$$

$U_{ph\,eff}$ Effektivwert der Phasen-Mittelpunkt-Spannung des Netzes

in eine Gleichspannung. Durch die Wirkungsweise des Gleichrichters wird der mit $\omega_N t$ vorwärtsdrehende Vektor in den Zeitabständen $\omega t = T/6$ um $2\pi/p$ zurückgeschaltet. Die Ausgangsspannung u_d ist die Projektion des geschalteten Netzspannungsvektors auf die reelle Achse (Bild 8). Für symmetrischen Betrieb, d.h. Gleichrichtersteuerwinkel $\alpha = 0$ ist

$$\bar{u}_d = U_{d0} = U \frac{p}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{p},$$

u_d schwankt zwischen $U_{d\,max} = U$ und $U_{d\,min} = U \cos \frac{\pi}{p}$.

Für unsymmetrischen Betrieb, d.h. Gleichrichtersteuerwinkel $\alpha \neq 0$, ist

$$\bar{u}_d = U_{d0} \cos \alpha.$$

u_d schwankt zwischen $U_{d\,max} = U \cos \alpha$ und $U_{d\,min} = U \cos(\alpha + 2\pi/p)$.

Der Ausgangsvektor des Gleichrichters im raumfesten Koordinatensystem entspricht dem Raumvektor des Wechselrichters im Wechselrichterkoordinatensystem. Der Gleichrichter kann als einfache Automatenstruktur simuliert werden. Bild 9 zeigt das Simulationsmodell des Antriebs aufgrund der im raumfesten Koordinatensystem gültigen Gleichung

$$u_d = u_M + i_M (R_{er} + R_{ex} + R_M) + (L_e + L_m) \frac{d i_M}{dt}.$$

R_{er} ohmscher Ersatzwiderstand des Gleichrichters,
R_{ex} induktiver Ersatzwiderstand des Gleichrichters,
R_M ohmscher Widerstand des Motors,
L_e Ersatzinduktivität des Stromrichters,
L_M Ankerkreisinduktivität des Motors.

Die Analogie zwischen einem Gleichstromantrieb und einem Drehstromantrieb in feldorientierter Darstellung wird aus dem Vergleich der Bilder 6 und 9 deutlich.

FACHTAGUNGEN

Elektronikausbildung und Elektromotorenentwicklung

132. Sektionskolloquium Automatisierungstechnik der Technischen Universität Karl-Marx-Stadt am 26. November 1987

Anläßlich des 60. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. *Helmut Olbrisch* [vgl. ELEKTRIE, Berlin 41 (1987) 11, S. 404] gestaltete die Sektion Automatisierungstechnik dieses Ehrenkolloquium.

Der Dekan der Fakultät für Elektroingenieurwesen, Prof. Dr. sc. techn. *Peter-Klaus Budig*, eröffnete die Veranstaltung mit der Begrüßung vieler Gäste und vor allem der Vertreter von Forschungspartnern der Sektion und wendete sich mit einer Laudatio an den Jubilar.

In einem durch Lichtbilder illustrierten Lebensbild stellte Prof. *Budig* den Entwicklungsweg von Prof. *Olbrisch* dar. Er würdigte dessen Verdienste auf technischem Gebiet vom Elektroinstallateur zum Hochschullehrer (Auszeichnung mit dem Nationalpreis 2. Klasse und als Verdienter Techniker des Volkes) sowie seine politische Wirksamkeit als Mitwirkender in der Antifa-Jugend, zahlreichen SED-Funktionen seit 1946, Kampfgruppenmitglied und stellvertretenden Vorsitzenden für Wissenschaft und Technik des Bezirksverbandes der KDT.

In seinem anschließenden Vortrag unter dem Thema „Entwicklung der Elektrotechnikausbildung — Stand und Perspektive" ging Prof. *Budig* von dem Grundsatz des Beschlusses des Politbüros und des Ministerrates der DDR zur Ingenieur- und Ökonomenausbildung aus und wies darauf hin, daß ein flexibler Einsatz der Absolventen für die Lösung von Automatisierungsaufgaben in den Betrieben auf der Basis der modernen Mikroelektronik und Rechentechnik gewährleistet werden muß.

Wir wollen und müssen Spitzenleistungen erreichen. Das Zusammenwirken von Physikern, Mathematikern und Ingenieuren ist eine unabdingbare Realität, und die Ingenieure müssen eine Vielzahl physikalischer Effekte beherrschen [vgl. *Conrad, H.; Kostenko, M.*: Zukunftsorientierte Ausbildung in der Elektrotechnik. ELEKTRIE, Berlin 41 (1987) 11, S. 405].

Es wird künftig zwei Profile der Elektrotechnikausbildung geben:

1. Ein auf die Forschung ausgerichtetes Profil mit theoretischer Fundierung und
2. ein betrieblich zugeschnittenes Profil, das im Hinblick auf die Erzeugnisproduktion sowie Wartung und Instandhaltung stärker technologisch und konstruktiv orientiert sein wird.

Bei der Erarbeitung der neuen Studiendokumente ist eine besondere Zeitstaffelung vorgesehen, die im fortgegeschrittenen Studiengang eine starke Hinwendung auf die Spezialausbildung vorsieht, um mehr Freiraum für die Bearbeitung von Lehr- und Forschungsprojekten zu schaffen.

Zur Sicherung der Spezialausbildung sollen vorwiegend neue Formen der Wissensvermittlung und Wissensaneignung wirksam werden. Dabei wird es besonders auf die individuelle Beratung der Hochschullehrer ankommen. Die Kompliziertheit der Gestaltung des Prüfungsplanes in der Spezialisierung ist nicht zu unterschätzen, da die Ergebnisse bei dieser Spezialausbildung in der Regel als Berichte vorgelegt und mündlich verteidigt werden.

Schließlich verwies der Referent noch darauf, daß dem Gebiet der Weiterbildung große Aufmerksamkeit zu widmen ist. Um den gestiegenen Anforderungen gerecht zu werden, sind Formen zu schaffen, die es ermöglichen, modernstes Wissen kurzfristig zum Tragen zu bringen und arbeitsplatzbezogen wirksam zu machen.

In einem weiteren Vortrag berichtete Dr. rer. nat. *Gläser* als Mitarbeiter der Forschungsgruppe am Lehrstuhl von Prof. *Olbrisch* über die „Ermittlung der Verteilung transienter Spannungen in Wicklungen elektrischer Maschinen". Kern der Untersuchungen sind die bei Schaltvorgängen auftretenden Überspannungen und deren Wirkungen auf elektrische Maschinen.

Ausgehend von der Grundschaltung zum Anschluß eines Hochspannungsmotors erläuterte Dr. *Gläser* die Anwendung von Überspannungsableiter und Schutzkondensator. Auf die Unterscheidung singulärer und multipler Überspannungen eingehend, wies der Referent nach, daß die gemessenen Überspannungsfaktoren den drei- bis zehnfachen Wert mit Stirnzeiten von 200 bis 600 ns erreichen können. Anhand aufgenommener Übergangsvorgänge wurde der typische Spannungs-Zeit-Verlauf bei multiplen Vorzündungen demonstriert.

Zur Ermittlung der Spannungsverteilung wurden folgende Prinzipien unterschieden und diskutiert:

a) Ermittlung unter realen Bedingungen Hochspannungsstoßgenerator (Kugelfunkenstrecke als Schalter),
b) Ermittlung mit Niederspannungsimpulsen — Repetitionsstoßgenerator (Thyristor als Schalter).
c) Berechnung der Spannungsverteilung.

Die Beanspruchung der Anfangsspulen von Hochspannungsmotoren, deren unterschiedliche Wirkung und die Minimierung der Belastung innerhalb der Spulen durch konstruktive und technologische Maßnahmen schlossen den Beitrag ab.

Der Abschlußvortrag, vom Jubilar selbst gehalten, stand unter dem Thema „Gestaltungsmöglichkeiten elektrotechnischer Baugruppen von Elektromotoren für eine automatisierte Fertigung".

Ausgehend von der bereits in der DDR eingerichteten bedienerarmen Produktion für Elektromotoren wurde anhand der Effektivitätsberechnung für Investitionen auf die notwendige Einflußnahme auf die Parameter Reparatur- und Wartungskosten sowie den Einfluß der Gesamtinvestitionskosten auf die Flexibilität und umgekehrt hingewiesen. Insbesondere wurde die Wirkung von Konstruktionsgestaltung und technologischem Ablauf auf die Investitionskosten dargestellt.

Durch Vereinfachung der herkömmlichen technologischen Verfahren, z. B. Fügen von passiven und aktiven Bauteilen zu Gruppen (Welle mit Wicklung, Ständer mit Wicklung, mechanische Bauteile untereinander) könnte durch den Übergang von diskontinuierlicher zu kontinuierlicher Fertigung eine Reduzierung der Investitionskosten erreicht werden. Die traditionell gewachsene Trennung von Entwicklung, Konstruktion und Technologie als Hindernis in dieser Hinsicht sollte überwunden werden.

Prof. *Olbrich* stellte als ersten Schritt auf diesem Wege Muster und Lösungsvorschläge für eine automatisierungsgerechte Ständergestaltung von Asynchronmotoren vor, auf deren Grundlage eine kontinuierliche Herstellung von Wicklungen möglich

---

5. Zusammenfassung

Die Simulation von Stromrichter-Maschinen-Systemen muß stets in einem einheitlichen Koordinatensystem erfolgen. Neben dem traditionell gebräuchlichen raumfesten Koordinatensystem kann der Simulation frequenzgesteuerter Drehstromantriebe auch ein feldorientiertes Koordinatensystem zugrunde gelegt werden. Das Systemmodell wird in diesem Koordinatensystem wesentlich einfacher und anschaulicher. Der notwendige Vektordreher kann heute mit der erforderlichen Genauigkeit auf dem Rechner abgebildet werden. Aus dem Analogiebetrachtungen läßt sich ein einfaches Verfahren zur Simulation von Stromrichter-Gleichstromantrieben in einem raumfesten Koordinatensystem ableiten, das im Unterschied zu klassischen Verfahren keine Beschreibung des Stromrichters als Netzwerk erfordert.

Literatur

[1] *Racz, I.*: Analysis of three phase semiconductor connections by Park-Vector. II. IFAC-Symposium on Power Electronics and Drives. Düsseldorf 1977, Tagungs-Bericht, S. 37–44

[2] *Wunsch G.*, u. a.: Handbuch der Systemtheorie. Berlin: Akademie-Verlag 1986

[3] *Owen, H. A.; Capel, A.; Ferrante, J. G.*: Simulation and Analysis Methods for Sampled power Electronic Systems. Nasa Lewis Research Center, PEDG'76 Record, S. 45–55

[4] *Büchner, P.*: Zustandsbeschreibung mit Ortszeigerdarstellung für Drehstromrichtersysteme. ELEKTRIE, Berlin 36 (1982) 2, S. 68–71

[5] *Schönfeld, R.; Büchner, P.*: Demonstration kontinuierlicher und diskontinuierlicher Antriebsregelungen mit dem iterativen Analogrechner. ELEKTRIE, Berlin 38 (1983) 3, S. 85–89

[6] *Hoffmann, W.*: Simulation in der Automatisierungstechnik. Siemens Energie und Automation 7 (1985) 6, S. 384

[7] *Bordry, F.; Martins, D.*: Simulation of power-electronic systems — computational method using variable step. 1. EPE Brüssel (1985) 1, S. 2.143

[8] *Surendran; Subrahmanyam*: Digital Simulation of an inverter induction motor. 1. EPE (1985) 2, S. 3.339

[9] *Richter, H.*: LENE – Ein CAD-Programm für leistungselektronische Systeme, ELEKTRIE, Berlin 40 (1986) 2, S. 57

[10] *Pizzo, del A.* u. a.: Mathematisches Modell umrichtergespeister Gleich- und Wechselstrommotoren mit besonderem Augenmerk auf die Stromverdrängungsphänomene. A. F. E. 69 (1986) 3, S. 155

[11] *Bellomi, A.; Pacas, J. M.; Späth, H.*: Digitale Simulation elektrischer Antriebe. E. u. M. 103 (1986) 10, S. 490–496

[12] *Lutz, R. V.*: Bestimmung des statischen und dynamischen Betriebsverhaltens von Stromrichterschaltungen. A. f. E. 70 (1987) 1, S. 39–48

EA 5856

wäre. Er stellte abschließend heraus, daß in vielen Fällen nur ein Kompromiß zwischen Konstruktion und Technologie zu einer elektrischen Maschine führen wird, deren Herstellung effektiv automatisiert werden kann.

G. Tippmann, Karl-Marx-Stadt EA 2738

FGE-Tagung

Berechnung der Netzzuverlässigkeit — ein neues Hilfsmittel der Planung?

Am 1. und 2. Oktober 1987 fand an der RWTH Aachen unter Leitung vom Prof. *Edwin* im Rahmen der Forschungsgesellschaft Energie (FGE) eine Fachtagung mit dem Thema „Berechnung der Netzzuverlässigkeit. Ein neues Hilfsmittel der Netzplanung?" statt, an der 200 Fachkollegen teilnahmen. Ziel der Tagung war es, deutlich zu machen, welche Möglichkeiten mathematischer Verfahren der Netzzuverlässigkeitsberechnung dem Ingenieur der Ausbauplanung bereits heute bieten, welche offenen Fragen aus theoretischer und praktischer Sicht noch bestehen und was demnach die nächsten Ziele der Zuverlässigkeitsforschung auf diesem Gebiet sein sollten. Übereinstimmend wird dabei vom einfachen Störungsfall, dem (n-1)-Kriterium, ausgegangen.

Nach 2 Einführungsvorträgen, die einen vorzüglichen Überblick über die grundsätzlichen Probleme gaben, wurden in 3 Diskussionsgruppen entwickelte und angewandte Verfahren und Modelle vorgestellt, die große Bedeutung einer Datenbasis herausgehoben und an Hand von Beispielen Anforderungen der Planungspraxis abgeleitet.

Im einzelnen wurden folgende Vorträge gehalten:

Begrüßung und Überblick

Klätte, G.

Begrüßung der Teilnehmer durch den Vorsitzenden des FGE-Kuratoriums

Edwin, K. W.

Zuverlässigkeitsbereehnung — ein Hilfsmittel der Planung elektrischer Energieversorgungssysteme

Haubrich, H.-J.

Methoden und Kriterien der Zuverlässigkeitsbewertung im Hoch- und Höchstspannungsnetz

Methoden, Verfahren und Modelle

Koglin, H.-J.

Modelle und Methoden der Netzzuverlässigkeitsberechnung

Roos, E.

ZUBER — ein Programmsystem zur Zuverlässigkeitsberechnung elektrischer Energieversorgungsnetze

Niehage, U.

Methoden der Netzzuverlässigkeitsberechnung — ein Verfahrensvergleich

Datenerhebung: Aufgaben und Ziele

Schweer, A. H.

Mängel der statistischen Datenbasis

Theil, G.

Statistische Erhebungen zur Berechnung der Netzzuverlässigkeit in Österreich

Wellßow, W.

Anforderungen an die Datenbasis für Netzzuverlässigkeitsberechnungen

Traeder, G.

Erweiterung der VDEW-Störungs- und Schadensstatistik — Probleme des Praxisbezugs und der Realisierbarkeit

Anforderungen der Planungspraxis

Ehmke, B.

Aufgaben der Zuverlässigkeitsberechnung aus der Sicht der Industrie

Bürgel, K.; Bohge, M.; Tillwicks, Th.

Netzzuverlässigkeitsberechnungen bei der BEWAG

Schwarz, J.

Bedeutung der Zuverlässigkeit für die Planung im Verbundnetz

Alle Beiträge sind im Heft 11 (1987) der Zeitschrift Energiewirtschaftliche Tagesfragen veröffentlicht.

H. Pundt, Dresden EA 2691

Zuverlässigkeitskriterien, die in verschiedenen Ländern genutzt werden

Zusammenfassung der Vorträge der Tagung des SC 37 in Oslo (Juni 1983)

[electra 110, Januar 1987]

In dem vorliegenden Beitrag werden Berichte aus 20 Ländern zusammengefaßt und verglichen.

Technische Kriterien als Zuverlässigkeitsgrenzwerte, Fehlerwahrscheinlichkeiten oder als „*Alles — oder Nichts*"-Kriterien — nach denen Vorfälle im Netz angenommen werden, die zu beherrschen sind — lassen sich leicht anwenden. Innerhalb der durch technische Kriterien gegebenen Grenzen wird dann ein ökonomisches Aufwandsminimum als Lösung gesucht.

Um die in gewisser Weise willkürliche Wahl solcher technischer Kriterien zu vermeiden, gehen mehrere Länder zu ökonomischen Kriterien über und streben ein ökonomisches „Gesamtoptimum" an. Dabei sind die Störungshäufigkeiten und die sozialökonomischen Auswirkungen schwer einzubeziehen.

Die Kriterien werden auch in deterministische und Wahrscheinlichkeitskriterien eingeteilt. Bei den ersteren geht man das Risiko ein, irgendwelche wichtigen Betriebsfälle nicht zu berücksichtigen. Wahrscheinlichkeitskriterien fordern einen hohen mathematischen Aufwand und ermöglichen schließlich keine direkte Zuordnung von Betriebssituationen zu den quantitativen Aussagen. Eine Kombination beider Kriterienarten bietet sich an. Eine weitere Einteilung in statische Kriterien (n-1-Prinzip) und transiente Kriterien (Stabilität im Sekundenbereich) wird vorgenommen.

Es wurde allgemein akzeptiert, daß Wahrscheinlichkeitskriterien einen besseren Maßstab darstellen als die deterministischen Kriterien. Brasilien und die USA wiesen jedoch darauf hin, daß deterministischen Kriterien unterschiedliche quantitative Zuverlässigkeitswerte zugeordnet werden können, d.h. daß Wahrscheinlichkeitsaussagen gegenwärtig noch in gewissem Umfang manipulierbar sind.

Die Bewertung der ausgefallenen Energie liegt im Bereich von 0,04 Dollar/kWh (Kanada) bis 275 Dollar/kWh (Italien).

Abschließend wurden im Beitrag Aussagen über die weitere Entwicklung von Zuverlässigkeitskriterien gemacht. Eine Übersetzung liegt im Kombinat Verbundnetze Energie, Abteilung TE, vor.

E. Muschick, Zittau EA 2707

BUCHER

Aufgabenstellungen und Entwurf von Binärsteuerungen

Von *J. Alder*. Reihe Automatisierungstechnik, Band 222. Berlin: VEB Verlag Technik 1986. 72 Seiten, 38 Bilder, 3 Tafeln. Broschur 4,80 M

Aufgrund der raschen Entwicklung der Mikroelektronik und Rechentechnik gewinnen der rechnergestützte Entwurf und die rechnergestützte Programmierung von Binärsteuerungen immer größere Bedeutung und sollen die intuitiven Beschreibungsmittel, wie Logikplan, Funktionsplan, Kontaktplan oder Anweisungsliste für umfangreiche Steuerungen ergänzen. In vorliegendem Band wird daher eine Methode zur Ausarbeitung einer rechnergestützten Aufgabenstellung für die Automatisierung eines binär zu steuernden Prozesses beschrieben. Der Prozeßablaufplan soll hierbei ein Prozeßmodell mit der Einordnung der Mensch-Maschine-Kommunikation darstellen und enthält als Lösung alle funktionellen Beziehungen, auch der Prozeßsicherung zwischen dem Prozeßeingang und -ausgang, die die projektierende Binärsteuerung zu realisieren hat.

Der Autor löst diese Aufgabe vorbildlich und beschreibt die Arbeitsmethode in folgender Reihenfolge:

- Mathematische Grundlagen mit der Aufteilung in Teilprozesse und deren Steuerrelationen bis zum Aufstellen des Prozeßablaufplanes und des Steuerungsablaufplanes
- praktische Ausführung durch Angabe von Anweisungen zum Aufstellen der Prozeßzerlegungsgraphen und des Prozeßablaufplanes sowie der Einordnung in MSR-Stellen des technologischen Schemas und die MSR-Stellenliste „Steuerung"
- Anwendung der Methode durch Aufführung eines praktischen Beispiels zum verfahrenstechnischen Prozeß „Harnstoffanlage" von der Formulierung der Aufgabenstellung über den Entwurf des Prozeßablaufplanes bis zum Ausfüllen der MSR-Listen und der Umwandlung in einen Steuerungsablaufplan.

Die vorgestellte Arbeitsmethode der binären Prozeßanalyse ist ein mögliches neues Beschreibungsmittel, das sowohl dem Prozeßtechnologen als auch dem Steuerungsprojektanten zum beiderseitigen Vorteil und zur Verständigung dienen kann. Sie wurde bewußt an das übliche Vorgehen der MSR-Projektanten angepaßt und wendet die gültigen Standards TGL 14091 und TGL 33247 konsequent an und gibt Empfehlungen zu deren Weiterentwicklung. Es kann eingeschätzt werden, daß durch die neue Form der Ausarbeitung der Aufgabenstellung der Steuerungsprojektant einen wesentlich fehlerärmeren Entwurf der Schaltung oder des Steuerrechnerprogramms erstellen kann, ohne seine bisherigen Arbeitsmethoden grundsätzlich zu verändern, und es ist der erste Teil einer durchgängigen Arbeitsmethode der rationellen Projektierung von der Technologie bis zur Inbetriebnahme von Binärsteuerungen.

H. Kloust, Berlin EA 2652

Elektrische Systeme und Netze

Von *N. W. Buslowa; W. N. Winoslawski; G. I. Denisenko; W. S. Perchatsch.* 1. Auflage, Kiew: Verlag Wistscha Schkola 1986, 584 Seiten, 240 Bilder, 24 Tafeln

Unter der redaktionellen Leitung des korrespondierenden Mitgliedes der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, *G. I. Denisenko*, entstand dieses umfangreiche Lehrbuch für Studenten in den Vertiefungsrichtungen der energetischen Elektrotechnik. Es wird aber auch Spezialisten der Fachrichtung empfohlen.

Das behandelte Stoffgebiet erstreckt sich von den allgemeinen Grundlagen elektrischer Systeme und Netze (Teil 1) über die Grundlagen für die Analyse stationärer Betriebszustände und die Betriebsführung elektrischer Netze und Systeme (Teil 2) bis zur Projektierung elektrischer Netze und Systeme (Teil 3). Ein ähnlich umfassendes Buch liegt im deutschsprachigen Schrifttum der DDR nicht vor. Die Stoffauswahl der beiden ersten Teile entspricht etwa den beiden im VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig erschienenen Bänden: Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze von *Koettnitz* und *Pundt* (Band 1) und *Schultheiß* und *Weßnigk* (Band II). Darüber hinaus werden die Fernübertragung und die Grundlagen der Betriebsführung behandelt. Vermißt wird bei der Darstellung der formalen Methoden der Netzberechnung ein Eingehen auf die strukturellen Besonderheiten der Elektroenergieversorgungsnetze und ihre Berücksichtigung in den Berechnungsmethoden.

Grundlage für den 3. Teil war offensichtlich die aus der Zusammenarbeit des Kiewer Polytechnischen Instituts und der Technischen Hochschule Leipzig hervorgegangene deutsch- und russischsprachige Gemeinschaftsauflage *Kloeppel/Butz/Winoslawski/Prachownik:* „Entwurf und Projektierung von Elektroenergieversorgungssystemen".

Im einzelnen werden behandelt: Speisequellen elektrischer Netze (12 Seiten), Hauptelemente von EES (19), Übertragungsleitungen (46), Umspannwerke und Verteilerstationen (9), Parameter und Ersatzschaltungen der Betriebsmittel (20), Analyse stationärer Betriebszustände mit traditionellen Methoden (62), Analyse des stationären Betriebsverhaltens mit formalisierten Methoden (66), Fernübertragung von Elektroenergie (63), Grundlagen der Betriebsführung von elektrischen Netzen und Systemen (49), Technisch-ökonomische Grundlagen der Projektierung (21), Ermittlung der elektrischen Belastungen (11), Auswahl der Netzkonfiguration (29), Wahl der Spannungsebenen sowie der Regel- und Kompensationseinrichtungen (15), Mechanische Berechnung von Freileitungen (25).

Auf nichtstationäre Vorgänge wird nicht eingegangen. Von besonderem Interesse für den in der Praxis tätigen Elektroingenieur dürften die im Anhang vollständig mit Rechenbeispielen gelisteten und kommentierten FORTRAN IV-Programme zu folgenden Problemen sein:

Berechnung der statischen Abhängigkeiten $P(U)$ und $Q(U)$ für eine asynchrone Last, Berechnung des Betriebsverhaltens Einspeisung — Abnehmer bei vorgegebener Spannung, Berechnung eines verzweigten Netzes bei gegebener Spannung, Berechnung eines Ringnetzes, Leistungsflußberechnung auf der Grundlage des Knotenverfahrens mit Seidel- und Gaußiteration, Leistungsflußberechnung nach dem Newton-Verfahren, Leistungsflußberechnung durch Iteration an der Knotenimpedanzmatrix, Leistungsflußberechnung unter Berücksichtigung der tatsächlichen Transformator-Übersetzungsverhältnisse, Berechnung der Freileitungsparameter.

Insgesamt liegt mit dem Buch eine vollständige Einführung in die Problematik des Entwurfs, der Berechnung und Betriebsführung von Elektroenergiesystemen vor, wie sie sich in ähnlicher Form auch im deutschsprachigen Schrifttum als sehr nützlich erweisen würde.

B. Oswald, Leipzig EA 2736

Digitale Regelsysteme

Von *R. Isermann.* 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Band I: Grundlagen, Deterministische Regelungen. 340 Seiten, 88 Bilder. Band II: Stochastische Regelungen, Mehrgrößenregelungen, Adaptive Regelungen, Anwendungen. 354 Seiten, 120 Bilder. Berlin: Springer-Verlag 1987

Schon die 1977 erschienene 1. Auflage des Buches hatte bald den Rang eines Standardwerkes. Inzwischen sind 10 Jahre vergangen und durch die Entwicklung der dezentral einsetzbaren Mikrorechentechnik gerade in diesem Zeitraum haben sich die Gewichte von den herkömmlichen kontinuierlichen Regelungen hin zu den zeitdiskreten deutlich weiter verschoben. Da die digitalen Regelalgorithmen softwaremäßig realisiert werden können, eröffnen sich dem Anwender wesentlich erweiterte Möglichkeiten. So haben Autor und Verlag wohl mit sicherem Gespür den rechten Zeitpunkt für eine zweite, stark überarbeitete und wesentlich erweiterte Auflage, die den Fortschritten Rechnung trägt, gewählt. Rein äußerlich unterscheidet sich diese Auflage von ihrem Vorgänger schon dadurch, daß sie auf zwei Bände angewachsen ist. Aber auch die Konzeption der beiden Bände weist die Entwicklung aus.

Der erste Band stellt nach der Einordnung der digitalen Regelungen die theoretischen Zusammenhänge linearer Abtastsysteme dar. Der zweite, umfangreichere Teil dieses ersten Bandes ist den Regelungen bei deterministischen Störungen gewidmet. Ergänzt wird das Gesamtgebiet durch einen Anhang, der wesentliche Grundzusammenhänge konzentriert zusammenstellt.

Im zweiten Band behandelt der Autor zunächst Regelungen unter dem Einfluß zeitdiskreter stochastischer Störungen. Für diesen Signaltyp werden die mathematischen Modelle (Korrelationsfunktionen, Markov-Signalprozeß, skalare stochastische Differenzengleichung) eingeführt. Seiner Bedeutung gemäß wird der parameteroptimierte Regler für stochastische Störsignale nur kurz angerissen, dagegen werden Minimalvarianzregler und Zustandsregler ausführlich erläutert. Ein weiterer Abschnitt ist vermaschten Regelungen (Kaskadenregelungen, Störgrößenaufschaltung) gewidmet. Im Abschnitt Mehrgrößenregelung einschließlich Zustandsgrößenschätzung bis hin zum Kalman-Filter setzt der Autor in die Zukunft weisende Akzente. Mit den beiden abschließenden Hauptabschnitten „Adaptive Regelungen" und „Zur digitalen Regelung mit Prozeßrechnern und Mikrorechnern" erreicht das Werk dann unzweifelhaft seinen Höhepunkt. Beispielsweise bei der sehr praktisch orientierten Darstellung der rekursiven Parameterschätzverfahren spürt man die langjährige Arbeit des Autors auf diesem Gebiet. Im Hinblick auf den Einsatz in Adaptivreglern besticht besonders die gründliche Auseinandersetzung mit den On-line-Schätzungen im geschlossenen Regelkreis. Aber auch die Programmpakete für die Prozeßidentifikation und zum Reglerentwurf wie auch die unterschiedlichen Einsatzbeispiele verdienen besondere Erwähnung. Das zweibändige Werk ist Lehrbuch und Nachschlagewerk zugleich. Es ist auch äußerlich gut aufgemacht und bebildert und flüssig geschrieben. Bei aller Breite in der Stoffauswahl hatte der Autor stets die Beschränkung auf das Wesentliche und die praktische Verwertbarkeit im Auge. Man muß kein Prophet sein, um dem Werk eine dankbare Aufnahme in der Fachwelt vorauszusagen.

D. Werner, Berlin EA 2669

Für ELEKTRIE 4/88 sind u. a. vorgesehen:

- *Wechselspannungs-Prüfanlage 3 MV/12,6 MVA — ein Beitrag zur Höchstspannungs-Energieübertragung*
- *Schaltungszusatz zur 3-MV-Wechselspannungs-Prüfanlage*
- *Hard- und Software für rechnergestützte Hochspannungsprüfungen mit Wechsel- und Gleichspannung*
- *Zur Bemessung des Primärschutzes von Umspannwerken auf der Grundlage des Streamer-Leader-Modells langer Luftfunkenstrecken*
- *Vor-Ort-Prüfung einer SF_6-isolierten Schaltanlage mit oszillierender Blitzspannung*

Die Redaktion

Документация

Кабиш, Х.

Вентильные преобразователи тока и электроприводы с изменением уставки скорости вращения в автоматизации процессов

ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 3, стр. 85—90, 40 рис., 4 табл., 13 лит.

Во вступительной части разграничиваются области применения техники вентильных преобразователей тока, представляется в общих чертах направление развития. Достигнутое состояние разъясняется на примере изделий народного предприятия Электропроект унд Анлагенбау Берлин. В соответствии с основным применением в „технике электроприводов с изменением скорости вращения" расматриваются требования и возможные решения, а также остальные основные направления развития техники электроприводов.

Краузе, Й.

Микроэлектроника в технике электроприводов — состояние и тенденции

ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 3, стр. 91—94, 4 рис., 3 табл., 16 лит.

Исходя из актуального профиля требований в функциональном отношении и описания достигнутого на практике и в теории состояния, описываются тенденции развития, подчеркивающие происходящую в настоящее время замену поколений, т.е. переход в широком плане от аналоговой к цифровой технике на микропроцессорных средствах.

Гайтнер, Г.-Х. и др.

Технологическая связь электроприводов постоянного тока с прямым цифровым управлением (DDC)

ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 3, стр. 95—100, 10 рис., 4 табл. 6 уравн., 6 лит.

Описывается достигнутое и проверенное на примере технологической связи двух приводов с DDC состояние в технике прямого цифрового управления электроприводами постоянного тока с помощью 8-разрядных процессоров. Аппаратное и программное обеспечение имеют модульное построение. Применнение специальной программы-администратора, реализующей основные функции операционной системы реального времени, а также подпрограмм, оптимизированных по отношению времени прохождения, обеспечивает время сканирования порядка нескольких миллисекунд и позволяет создание программного обеспечения с обозримым построением.

Будиг, П.-К.

Электроприводы трехфазного тока с изменяемой скоростью вращения

ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 3, стр. 100—108, 31 рис., 3 табл., 3 уравн., 4 лит.

Описываются возможности изменения уставки скорости вращения асинхронных машин с помощью средств микроэлектроники и мощной электроники. Исследуются при этом типы вентильных преобразователей тока, вентильный преобразователь тока на вольтовом промежуточном контуре, тактированный и пульсирующий режимы. После этого дается определение потерь и моментов качания асинхронных машин, представляется пакет программ PEMOVER для определения допускаемых вращающих моментов. В заключение еще представляется теоретическая основа динамически особенно ценной регулировки ориентированной на поле.

Фишер, В.; Мекке, Х.

Тиристорный сварочный преобразователь тока

ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 3, стр. 109—112, 8 рис., 8 уравн., 6 лит.

Сварочные преобразователи представляют собой новое поколение источников тока. Согласование их с процессом сварки осуществляется путем управления инвертором. На основе модели, пригодной для инженерных расчетов, даются заключения относительно поведения в стационарном режиме тиристорных сварочных преобразователей тока. Возможная экономия энергии документируется посредством результатов измерений.

Шёнфельд, Р.; Ойлитц, Т.

Моделирование систем вентильных машин

ELEKTRIE, Берлин 42 (1988) 3, стр. 112—116, 7 рис., 18 уравн., 12 лит.

Моделирование систем вентильных машин требует описания системы в единой координатной системе. Пригодными являются постоянные по пространству (ориентированные на статор) и вращающиеся синхронно с выходным сигналом инвертора (ориентированные на поле) координатные системы. Описываются выводы, вытекающие из этого для моделирования на ПЭВМ электроприводов трехфазного и постоянного токов.

Documentation

Kabisch, H.

Inverter and Adjustable-Speed Drives in the Process Automation

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988), 3, pp. 85—90, 4 Figs., 4 Tables, 13 Refs.

Preliminary the fields of use of the inverter techniques are outlined and the development trend is mapped. Thereby the reached state is illustrated by products of the VEB Elektroprojekt und Anlagenbau of Berlin. Corresponding to the application centre „adjustablespeed drive techniques" requirements and solution possibilities as well as the further developemnt trends of the drive techniques are discussed.

Krause, J.

Microelectronics in the Drive Techniques — State and Trends

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 3, pp. 91—94, 4 Figs., 3 Tables, 16 Refs.

Starting from the actual requirement outline in functional respects and from a situation description of the practical and theoretical state development trends are described, which are underlining the generation change, at present occuring, that is the large transition from the analogue to the digital techniques, basing upon microcomputers.

Geitner, G.-H. et al.

Technological Coupling of DDC-D.C. Drives

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 3, pp. 95—100, 10 Figs., 4 Tables, 6 Equations, 6 Refs.

The reached state, tested by example of technological coupling two DDC-drives, in the direct digital control of d.c. drives with 8 bit processors is described. Hardware and software are set up modularly. The application of a special management programme, which realizes fundamental functions of a real-time simulation system, as well as of subroutines, optimized with regard to the delay time, provide for scanning times of the ms-area and make possible a clearly structured software.

Budig, P.-K.

Speed-Variable Three-Phase Drives

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 3, pp. 100—108, 31 Figs., 3 Tables, 30 Equations, 4 Refs.

The possibilities of the speed regulation of ASM by means of the micro- and power-electronics are described. Thereby the types of the inverters and of the voltage intermediate circuit inverters and timed and pulsed operation are studied. It follows the determination of the losses ans oscillating moments of the ASM as well as the representation of the programme packet PEMOVER, adapted to evaluating the reliable torques. Finally, the theoretical base of the dynamically high-graded regulation, oriented to the field, is represented.

Fischer, W.; Mecke, H.

Thyristor Welding Inverters

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 3, pp. 109—112, 8 Figs., 8 Equations, 6 Refs.

Welding inverters represent a new generation of current sources. Its adaption to the welding process occurs by controlling an inverter. On base of a model, adapted to engineering dimensioning, statements to the stationary operating behaviour of thyristor welding inverters are given. The possible energy savings are documented by measuring results.

Schönfeld, R.; Eulitz, T.

Simulation of Inverter-Machine-Systems

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 3, pp. 112—116, 7 Figs., 18 Equations, 12 Refs.

The simulation of inverter-machine-systems requires the system description in a generalized coordinate system. Useable are space-fixed (stator oriented) and synchronously with the inverter output signal rotating (field oriented) coordinate systems. The consequences are described, thereby resulting to simulating three-phase and d-c-drives by means of working place related computers.

Kabisch, H.

Stromrichter und drehzahlverstellbare Antriebe in der Prozeßautomatisierung

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 3, S. 85–90, 4 Bilder, 4 Tafeln, 13 Lit.

Es werden einleitend die Anwendungsgebiete der Stromrichtertechnik abgesteckt und die Entwicklungsrichtung skizziert. Der dabei erreichte Stand wird an Erzeugnissen des VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin erläutert. Entsprechend dem Anwendungsschwerpunkt „Drehverstellbare Antriebstechnik" wird auf Anforderungen und Lösungsmöglichkeiten sowie die weiteren Hauptentwicklungsrichtungen der Antriebstechnik eingegangen.

Krause, J.

Mikroelektronik in der Antriebstechnik – Stand und Tendenzen

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 3, S. 91–94, 4 Bilder, 3 Tafeln, 16 Lit.

Ausgehend vom aktuellen Anforderungsprofil in funktioneller Hinsicht und einer Situationsbeschreibung zum praktischen und theoretischen Stand werden Entwicklungstendenzen beschrieben, die den sich gegenwärtig vollziehenden Generationswechsel, also den großflächigen Übergang von der Analog- zur mikrorechnerbasierten Digitaltechnik unterstreichen.

Geitner, G.-H., u. a.

Technologische Kopplung von DDC-Gleichstromantrieben

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 3, S. 95–100, 10 Bilder, 4 Tafeln, 6 Gln., 6 Lit.

Es wird der am Beispiel der technologischen Kopplung zweier DDC-Antriebe ausgetestete erreichte Stand bei der direkten digitalen Regelung von Gleichstromantrieben mit 8-bit-Prozessoren beschrieben. Hard- und Software sind modular aufgebaut. Der Einsatz eines speziellen Verwaltungsprogramms, das Grundfunktionen eines Echtzeit-Betriebssystems realisiert, sowie laufzeitoptimierter Unterprogramme gewährleistet Abtastzeiten im ms-Bereich und ermöglicht eine übersichtlich aufgebaute Software.

Budig, P.-K.

Drehzahlvariable Drehstromantriebe

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 3, S. 100–108, 31 Bilder, 3 Tafeln, 30 Gln., 4 Lit.

Es werden die Möglichkeiten der Drehzahlstellung von ASM mit den Mitteln der Mikro- und Leistungselektronik beschrieben. Dabei werden die Typen der Wechselrichter und der Spannungszwischenkreis-Wechselrichter und getakteter und gepulster Betrieb untersucht. Es folgt die Bestimmung der Verluste und Pendelmomente der ASM sowie die Vorstellung des Programmpakets PEMOVER zur Ermittlung der zulässigen Drehmomente. Schließlich wird noch die theoretische Grundlage der dynamisch hochwertigen feldorientierten Regelung vorgestellt.

Fischer, W.; Mecke, H.

Thyristorschweißumrichter

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 3, S. 109–112, 8 Bilder, 8 Gln., 6 Lit.

Schweißumrichter stellen eine neue Stromquellengeneration dar. Ihre Anpassung an den Schweißprozeß erfolgt durch die Steuerung des Wechselrichters. Auf der Grundlage eines für die ingenieurmäßige Dimensionierung geeigneten Modells werden Aussagen zum stationären Betriebsverhalten von Thyristorschweißumrichtern getroffen. Die mögliche Energieeinsparung wird durch Meßergebnisse dokumentiert.

Schönfeld, R.; Eulitz, T.

Simulation von Stromrichter-Maschinen-Systemen

ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 3, S. 112–116, 7 Bilder, 18 Gln., 12 Lit.

Die Simulation von Stromrichter-Maschinen-Systemen erfordert die Systembeschreibung in einem einheitlichen Koordinatensystem. Brauchbar sind raumfeste (ständerorientierte) und synchron mit dem Wechselrichterausgangssignal umlaufende (feldorientierte) Koordinatensysteme. Die Konsequenzen, die sich daraus für die Simulation von Drehstrom- und Gleichstromantrieben auf Arbeitsplatzrechnern ergeben, werden beschrieben.

Herausgeber	Kammer der Technik, Fachverband Elektrotechnik
Verlag	VEB Verlag Technik Oranienburger Str. 13/14, Berlin, DDR, 1020 Telegrammadresse: Technikverlag Berlin Telefon: 28700; Telex: 0112228 techn. dd
Verlagsdirektor	Dipl.-Ing. *Klaus Hieronimus*
Redaktion	Dr.-Ing. *Klaus Heide*, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 2870345) Ing. *Günther Barth*, Redakteur (Telefon 2870343)
Lizenz-Nr.	1100 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik
Gesamtherstellung	III/18/328 Messedruck Leipzig, Bereich Borsdorf Borsdorf, 7122
Gestalter	*Eckardt Natorp* (Telefon 28 70 287)
Anzeigenannahme	Für Bevölkerungsanzeigen alle Anzeigenannahmestellen in der DDR, für Wirtschaftsanzeigen der VEB Verlag Technik, Oranienburger Str. 13/14, Berlin, 1020 PSF 201 Anzeigenpreisliste Nr. 7 Auslandsanzeigen: Interwerbung GmbH, Hermann-Duncker-Str. 89, Berlin, DDR, 1157
Erfüllungsort und Gerichtsstand	Berlin-Mitte.
AN (EDV)	6730
Erscheinungsweise	monatlich 1 Heft
Heftpreis	2,50 M, Abonnementpreis vierteljährlich 7,50 M. Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebes BUCHEXPORT zu entnehmen.
Bezugsmöglichkeiten DDR	sämtliche Postämter
SVR Albanien	Direktorije Quendrore e Perhapjes dhe Propaganditit te Librit Rruga Konference e Pezes, Tirana
VR Bulgarien	Direkzia R. E. P., 11 a, Rue Paris, Sofia
VR China	China National Publications Import and Export Corporation, West Europe Department, P. O. Box 88 Beijing
ČSSR	PNS – Ústřédni Expedicia a Dovoz Tisku Praha, Slezská 11, 12000 Praha 2 PNS, Ústredna Expedicia a Dovoz Tlače Praha, Posta 022, 885 47 Bratislava
SFR Jugoslawien	Jugoslovenska Knjiiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knjižarsko Produzéće MLADOST, Ilica 30, Zagreb
Koreanische DVR	CHULPANMUL Korea Publications Export & Import Corporation, Pyongyang
Republik Kuba	Empresa de Comercio, Exterior de Publicationes, O'Reilly No. 407, Ciudad Habana
VR Polen	C. K. P. i. W. Ruch, Towarowa 28, 00-958 Warszawa
SR Rumänien	D. E. P. Bucaresti Piata Scinteii, Bucaresti
UdSSR	Städtische Abteilungen von Sojuzpečat' oder Postämter und Postkontore
Ungarische VR	P. K. H. I., Külföldi Elöfizetési Osztály, P. O. Box 16, 1426 Budapest
SR Vietnam	XUNHASABA 32, Hai Ba Trung, Ha Noi
BRD und Berlin (West)	ESKABE Kommissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141–167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstraße 111, Berlin (West) 30
Österreich	Helios Literatur-Vertriebs-GmbH & Co. KG, Industriestraße B 13, 2345 Brunn am Gebirge
Schweiz	Verlagsauslieferung Wissenschaft der Freihofer AG, Weinbergstr. 109, 8033 Zürich
Alle anderen Länder	örtlicher Fachbuchhandel; BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, Leipzig, DDR, 7010, Postfach 160 und Leipzig Book Service, Talstraße 29, Leipzig, DDR, 7010

Berlin-Mitte. Der Verlag behält sich alle Rechte an den von ihm veröffentlichten Aufsätzen und Abbildungen, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vor. Auszüge, Referate und Besprechungen sind nur mit voller Quellenangabe zulässig.

Tafel 3. Hauptanwendungsgebiet: Elektrotechnologische Prozesse

Lfd. Nr.	Erzeugnis-Benennung	An-schluß-spannung V	Aus-gangs-strom A	Hersteller-betrieb	Sonstiges
3.1.	Parallel-Schwingkreis-Umrichter 1M	380	330 bis 2600	VEB Inducal Göllingen	Stromrichter-Schränke für Speisung von Mittelfrequenz-Anlagen der industriellen Elektrowärme, Ausgangsfrequenzen bis 2 kHz (Leistungsteil von VEB EAW-Berlin)
3.2.	Industrie-Ofen-schalter (Ds-Steller) TLS 3.1	380, 500	25, 40 63, 90 kVA	VEB Numerik „Karl Marx"	Stromrichter-Satz für Energiedosierung von Heizanlagen (Pulspaketsteuerung)
3.3.	Thyristor-Stromrichter für Glüheinrichtungen usw. ET 1, DT 1, DT 2	bis 380	30 bis 1800	VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin	Stromrichter-Schränke Aus den Antriebsstromrichtern modifiziert, verschiedene Schaltungen
3.4.	Stromrichter für Lichtbogenschweißen	220, 380	130 bis 180	VEB Schweißtechnik Finsterwalde/ Werk für elektr. Anlagen Woltersdorf	
3.5.	Stromrichter für Lichtbogenschweißen	220, 380, 440, 500	250 bis 1400	VEB Schweißtechnik Finsterwalde/ VEB Transformatorenwerk Reichenbach	
3.6.	Stromrichter für Plasmaschneiden	220, 380, 440, 500	35, 80 250	desgl.	

Stromrichterprogramme der DDR-Herstellerbetriebe – ein Überblick s. Seite 84

Tafel 7: Hauptanwendungsgebiet Stromversorgung von Hochstromanlagen für Elektrolyse und Galvanik

Lfd. Nr.	Erzeugnis-Benennung	An-schluß-spannung V	Aus-gangs-strom A	Herstellerbetrieb	Sonstiges
7.1.	Diodengleichrichter mit forcierter Luftkühlung für Elektrolysen B6-Schaltung M6-Schaltung	unterschiedlich	bis 8000 bis 16000	VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin	mit Diodenblöcken vom VEB EAW-Berlin
7.2.	desgl. mit Wasserkühlung B6-Schaltung M6-Schaltung	desgl.	6,3 bis 16,5 kA 12 bis 33 kA	desgl.	desgl.
7.3.	Spannungsquellen für die Galvanotechnik	380	60 bis 600	VEB Galvanotechnik Leipzig	Öl-Luft-Kühlung
7. 4.	desgl.	380	400 bis 6000	desgl.	Öl-Wasser-Kühlung

Tafel 4. Hauptanwendungsgebiet: Gleichspannungsversorgung

Lfd. Nr.	Erzeugnis-Benennung	An-schluß-spannung V	Aus-gangs-strom A	Hersteller-betrieb	Sonstiges
4.1.	Stromrichter für Batterieladung in Fernmelde- und Signalanlagen	220/ 380 Ds 24/60/ 220 Gs	5 bis 200	VEB Elektrowärme Sörnewitz	zahlreiche Ausführungen
4.2.	Stromrichter für Batterieladung in Industrie und Energieversorgung	380/660	63 bis 2000	desgl.	mehrere Ausführungen
4.3.	Stromrichter für statische Erregung von Synchronmaschinen	unterschiedlich	50 bis 1400	VEB Elektromaschinenbau Dresden Sachsenwerk	für zahlreiche Generatoren-Typen (< 0,5 bis 100 MW) und Motoren (< 2,0 bis > 2,0 MW) vorwiegend Schrankausführung
4.4.	Dioden-Gleichrichtergeräte für Batterieladung und Widerstandsbelastung	220, 380	2,5 bis 100	VEB EAW-Elektronik Dresden	vorwiegend für Starterbatterien, Flurförderzeug- und stationäre Batterien
4.5.	Dioden-Gleichrichter für Industrie-Stromversorgungen	380, 500, 660	50 bis 5000	VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin	Schrankausführung
4.6.	Thyristor-Lichtsteller für kulturelle Einrichtungen			VEB Starkstrom-Anlagenbau Leipzig/Halle	
	– stationär TS	250	1 bis 10 kVA		
	– transportabel TP	380	1 und 2 kVA		

Tafel 5. Hauptanwendungsgebiet: Wechselspannungsversorgung

Lfd. Nr.	Erzeugnis-Benennung	An-schluß-spannung V	Aus-gangs-strom A	Hersteller-betrieb	Sonstiges
5.1.	Thyristor-Stromrichter für Stromversorgungsanlagen DT 1/SVA DT 2/SVA	380	40 bis 500	VEB Robotron Anlagenbau Senftenberg mit Stromrichtern des VEB EAB Berlin	Stromversorgung von z. B. EDVA in Kombination mit schwungradgestütztem Maschinensatz
5.2.	Thyristor-Stromrichter für statische unterbrechungsfreie Stromversorgung/SUSV	380 Ds, 220 Gs-Batterie-spannung	16 bis 100	VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin	Stromversorgung von z. B EDVA und industriellen Steuerungen

Tafel 6. Hauptanwendungsgebiet: Stromversorgung von Gs-Bahnen

Lfd. Nr.	Erzeugnis-Benennung	An-schluß-spannung V	Aus-gangs-strom A	Herstellerbetrieb	Sonstiges
6.1.	Dioden-Gleichrichter mit Luftselbstkühlung	250 bis 3000	500 bis 3000	VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin	Diodenblöcke von VEB EAW-Berlin

ISSN 0013—5399
ELEKTRIE · Berlin 42 (1988)

6(30 3 177 027 465
KUMB KERAM WERKE
8612 7001 0136 PF 1

VEB Robotron
Büromaschinenwerk
„Ernst Thälmann" Sömmerda
Weißenseer Straße 52
Sömmerda
DDR - 5230

Exporteur:
Robotron Export–Import
Volkseigener Außenhandelsbetrieb der
Deutschen Demokratischen Republik
Allee der Kosmonauten 24
Berlin
DDR - 1140

Er hat mich überzeugt, der robotron 6313:

viele Schriften zur Auswahl
beachtliche Grafikfähigkeit
leicht austauschbare Interface